

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Tin Čurić**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentori:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Student:

Tin Čurić

Zagreb, 2017.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **TIN ĆURIĆ**

Mat. br.: 0035192595

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku: **MIG ZAVARIVANJE Al LEGURA**

Naslov rada na  
engleskom jeziku: **MIG WELDING OF Al ALLOYS**

Opis zadatka:

U uvodu rada proučiti primjenu aluminijskih legura u brodogradnji. Navesti i opisati tehnologije zavarivanja primjenjive u brodogradnji za zavarivanje aluminijskih limova. Detaljno proučiti primjenu MIG zavarivanja za spajanje aluminijskih legura. Analizirati pripremu spojeva za zavarivanje aluminija prema normi HRN EN ISO 9692-3.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi tehnologiju zavarivanja Al legure EN AW 5083 H111. Izvesti zavarivanje sučeljenog spoja limova sa različitim oblicima pripreme spoja. Nakon zavarivanja ispitati zavareni spoj penetrantskom metodom te savijanjem prema normi HRN EN ISO 5173:2010. Donijeti zaključak o primjenjenoj tehnologiji i utjecaju pripreme spoja na kvalitetu zavarenog spoja.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

v.d. predsjednika Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Zoranu Kožuhu, asistentu dr.sc. Matiji Bušiću, dipl. ing. stroj. na stručnoj pomoći i strpljenju u izradi ovog rada.

Također se zahvaljujem laborantima Katedre za zavarene konstrukcije koji su pružili stručnu pomoć prilikom izrade ovog rada te omogućili kvalitetno izvođenje eksperimentalnog dijela rada.

Tin Ćurić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	I
POPIS TABLICA .....	III
SAŽETAK .....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD.....	1
1.1. Aluminij.....	1
1.2. Svojstva aluminija.....	2
1.3. Aluminijeve legure.....	4
1.3.1. Označavanje aluminijevih legura.....	5
1.3.1.1. Označavanje gnječenih aluminijevih legura.....	5
1.3.1.2. Označavanje lijevanih aluminijevih legura.....	6
1.3.2. Gnječene aluminijeve legure.....	8
1.3.3. Lijewane aluminijeve legure.....	9
1.4. Primjena aluminijevih legura u brodogradnji.....	10
1.4.1. Primjena gnječenih aluminijevih legura u brodogradnji.....	12
1.4.2. Primjena lijevanih aluminijevih legura u brodogradnji.....	13
2. ZAVARIVANJE ALUMINIJA I ALUMINJEVIH LEGURA.....	15
2.1. Zavarljivost aluminija.....	16
2.1.1. Poroznost.....	16
2.1.2. Uklanjanje oksidnog filma.....	18
2.1.3. Tople pukotine.....	19
2.1.4. Redukcija čvrstoće zavara i zone utjecaja topline.....	20
2.2. Postupci zavarivanja aluminijevih legura primjenjivih u brodogradnji.....	21
2.2.1. Zavarivanje TIG postupkom.....	22
2.2.2. Zavarivanje elektrolučnim plazma postupkom.....	24
2.2.3. Zavarivanje laserom.....	25
2.2.3.1. Hibridno lasersko zavarivanje.....	26
2.2.4. Friction Stir postupak zavarivanja.....	27
2.3. MIG zavarivanje aluminijevih legura.....	29
2.3.1. Prijenos metala pri MIG zavarivanju.....	31
2.3.2. Zaštitni plinovi.....	34
2.3.3. Oprema i izvori struje za MIG zavarivanje.....	36
2.3.3.1. Izvori struje.....	36
2.3.3.2. Pogonski sustav žice.....	40
2.3.3.3. Pištolj za zavarivanje.....	41
2.3.4. Impulsno MIG zavarivanje.....	42
2.3.5. Automatizirano i robotizirano MIG zavarivanje.....	44
2.4. Priprema spojeva za zavarivanje aluminija prema normi HRN EN ISO 9692-3.....	46

---

3. EKSPERIMENTALNI RAD.....	49
3.1. Osnovni i dodatni materijal.....	49
3.1.1. Svojstva i kemijski sastav osnovnog materijala AW 5083-H111.....	49
3.1.2. Mehanička svojstva i kemijski sastav dodatnog materijala.....	50
3.2. Izvor struje za zavarivanje.....	51
3.3. Ostala oprema .....	52
3.3.1. Uređaj za automatizirano gibanje pištolja.....	52
3.3.2. Podloge za zavarivanje.....	53
3.4. Zavarivanje uzoraka.....	54
3.5. Nerazorno ispitivanje penetrantima.....	58
3.6. Ispitivanje savijanjem.....	61
3.7. Makro i mikroskopska analiza.....	66
3.7.1. Makro izbrusci.....	66
3.7.2. Mikroskopska analiza.....	67
4. ZAKLJUČAK.....	70
LITERATURA.....	72
PRILOZI.....	74

## POPIS SLIKA

Slika 1. Grafički prikaz topljivosti vodika u aluminiju [3].....	17
Slika 2. Ponašanje elektrode ovisno o vrsti struje i polu spajanja [3].....	19
Slika 3. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [8].....	23
Slika 4. Shematski prikaz hibridnog laserskog zavarivanja [13].....	27
Slika 5. Shema elektrolučnog zavarivanja taljivom metalnom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova [16].....	29
Slika 6. Posljedica pozicije elektrode i tehnike zavarivanja na širinu i penetraciju zavara [16].....	30
Slika 7. Shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojevima [18].....	32
Slika 8. Shematski prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom [18].....	32
Slika 9. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [18].....	33
Slika 10. Usporedba utjecaja argona i helija na penetraciju i širinu zavara [19].....	35
Slika 11. Prikaz osnovne opreme za MIG zavarivanje [18].....	36
Slika 12. Dijagram struje i napona prikazuje strmopadajuću izlaznu karakteristiku, CC–constant voltage [18].....	38
Slika 13. Dijagram struje i napona prikazuje ravnu izlaznu karakteristiku, CV–constant voltage [20].....	38
Slika 14. Poprečni presjek pištolja za zavarivanje [18].....	41
Slika 15. Prikaz faza u prijenosu metala pri impulsnom zavarivanju [20].....	43
Slika 16. Izvor struje za zavarivanje Welbee P400.....	51
Slika 17. Uređaj za automatizirano gibanje pištolja.....	52
Slika 18. Keramička podloga [30].....	53
Slika 19. Prikaz bakrene podloge.....	53
Slika 20. Lice zavara uzorka A.....	56
Slika 21. Korijen zavara uzorka A.....	57
Slika 22. Lice zavara uzorka B.....	57
Slika 23. Korijen zavara uzorka B.....	58
Slika 24. Ispitivanje penetrantima lica zavara uzorka A.....	59
Slika 25. Ispitivanje penetrantima korijena zavara uzorka A.....	59
Slika 26. Ispitivanje penetrantima lica zavara uzorka B.....	60

Slika 27. Ispitivanje penetrantima korijena zavora uzorka B.....	60
Slika 28. Lokalizacija izrezivanja ispitnih uzoraka [30].....	61
Slika 29. Priprema za rezanje ispitnih uzoraka.....	62
Slika 30. Prikaz ispitivanja sučeonog zavarenog spoja na savijanje [29].....	63
Slika 31. Prikaz ispitivanja savijanjem u Laboratoriju za zavarivanje na FSB [30].....	63
Slika 32. Prikaz makro izbruska uzorka A.....	66
Slika 33. Prikaz makro izbruska uzorka B.....	66
Slika 34. Mikroskopska analiza uzorka A – detalj lica zavora, lijevo.....	67
Slika 35. Mikroskopska analiza uzorka A – detalj lica zavora, desno.....	67
Slika 36. Mikroskopska analiza uzorka A – detalj korijen zavora.....	68
Slika 37. Mikroskopska analiza uzorka B – detalj lica zavora, lijevo.....	68
Slika 38. Mikroskopska analiza uzorka B – detalj lica zavora, desno.....	69
Slika 39. Mikroskopska analiza uzorka B – detalj korijen zavora.....	69



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba osnovnih svojstava aluminijskih legura i konstrukcijskih čelika [12]...	3
Tablica 2. Numeričke oznake gnječenih Al legura [5].....	6
Tablica 3. Numeričke oznake osnovnih 11 podskupina lijevanih Al legura [5].....	8
Tablica 4. Usporedba mase elemenata izrađenih od čelika ili aluminija [8].....	11
Tablica 5. Promjena mehaničkih svojstava aluminijske legure numeričke oznake 5083 u žarenom stanju (O) između temperatura -196 °C do +200 °C.[8].....	12
Tablica 6. Prikaz prigodnosti inženjerske upotrebe preporučenih lijevanih aluminijskih legura [8].....	14
Tablica 7. Zahtjevi mehaničkih svojstava osnovnog materijala i metala zavara dobivenog MIG postupkom te tipične vrijednosti mehaničkih svojstava trenjem dobivenog zavarenog spoja [14].....	28
Tablica 8. Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge [24].....	48
Tablica 9. Nastavak [24].....	49
Tablica 10. Mehanička svojstva osnovnog materijala [25].....	49
Tablica 11. Kemijski sastav osnovnog materijala [25].....	50
Tablica 12. Kemijski sastav dodatnog materijala [26].....	50
Tablica 13. Mehanička svojstva dodatnog materijala [27].....	50
Tablica 14. Prikaz tehničkih specifikacija izvora struje za zavarivanje Welbee P400.....	51
Tablica 15. Specifikacije postupka zavarivanja uzorka A.....	54
Tablica 16. Specifikacije postupka zavarivanja uzorka B.....	55
Tablica 17. Rezultati savijanja lica i korijena zavara uzorka A.....	64
Tablica 18. Rezultati savijanja lica i korijena zavara uzorka B.....	65

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznake</b>	<b>Opis</b>
Al	aluminij
Mg	magnezij
Cu	bakar
Mn	mangan
Zn	cink
Ti	titan
Fe	željezo
Mg <sub>2</sub> Si	Magnezij silicid
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminijev oksid
CO <sub>2</sub>	Ugljikov dioksid
Ar	argon
He	helij
$R_m$	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]
$Q$	Unos topline [kJ/mm]
$v_z$	Brzina zavarivanja [mm/min]
$\eta$	Stupanj iskoristivosti [%]
I	Jakost struje [A]
U	Napon struje [V]
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u atmosferi inertnog plina
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u atmosferi inertnog
HB	Tvrdoća po Brinellu
DC	Istosmjerna struja
AC	Izmjenična struja

## SAŽETAK

Tema ovog rada je „MIG zavarivanje Al legura“. Rad je podijeljen u dva dijela, prvi teorijski te drugi eksperimentalni dio.

U teoretskom dijelu opisan je značaj i svojstva aluminija i njegovih legura s posebnim osvrtom na primjenu aluminijevih legura u brodogradnji. Ukratko su objašnjeni postupci zavarivanja aluminijevih legura, poput TIG-a, elektrolučnog plazma postupka, laserskog i friction stir postupka, a detaljnije je opisan MIG postupak zavarivanja. U posljednjem dijelu dan je pregled pripreme spojeva za zavarivanje aluminijevih legura prema normi HRN EN ISO 9692-3.

U eksperimentalnom dijelu su zavarena dva sučeljena spoja aluminijeve legure EN AW 5083, jedan s keramičkom podlogom, a drugi koristeći bakrenu podlogu. Aluminijski limovi pripremljeni su sukladno normi HRN EN ISO 9692-3. Za zavarivanja korišten je MIG impulsni postupak zavarivanja. Provedena su nerazorna ispitivanje penetrantima i ispitivanje savijanjem lica i korijena zavara te je izvršena mikroskopska analiza. Na temelju dobivenih rezultata eksperimentalnog rada donesen je zaključak.

Ključne riječi: Aluminij, Al legure u brodogradnji, impulsno MIG zavarivanje, norma HRN EN ISO 9692-3

## SUMMARY

The theme of this thesis is „GMAW welding of Al alloys“. It is divided into two parts, the first one being theoretical and the second experimental.

The theoretical part describes the character and properties of aluminum and its alloys with special emphasis on the application of aluminum alloys in shipbuilding. It briefly explains the welding processes used for aluminum alloys, such as TIG, the arc plasma welding (PAW), laser and friction stir welding, furthermore it contains detail description of GMAW welding process. The final section gives an overview of recommended types of joint preparation for GMAW or GTAW process on aluminum alloys according to HRN EN ISO 9692-3.

In the experimental part, sheets made out of aluminum alloy EN AW 5083 were butt welded, one pair of sheets using ceramic backing material and the other using copper backing plate. Aluminum sheets were prepared according to HRN EN ISO 9692-3 standard. Welding was done using GMAW pulse technology. We tested welds using non-destructive dye penetrant method and root and face bend tests, as well making the microscopic analysis. Based on the results of experimental work the conclusion was made.

Keywords: Aluminum, Al alloys in shipbuilding, pulse GMAW welding, HRN EN ISO 9692-3 standard

# 1. UVOD

## 1.1. Aluminij

Aluminij se u prirodi nalazi u obliku oksida i smjese oksida iz kojih se metal izdvaja skupim elektrolitičkim postupkom. [1]

Drugi u izobilju metalni materijal na planeti, aluminij postaje dio ekonomskog natjecanja u inženjerskoj primjeni tek krajem 19. stoljeća. Prvi aluminij proizveden je uporabom skupog redukcijskog sredstva u obliku metalnog kalija. Uspjelo je to danskom kemičaru H.C. Ørstedu 1825. godine. [1]

Henri Sainte-Claire Deville je 1850.-tih osnovu prethodno razvijenih, komercijalno neisplativih metoda, unaprijedio što je omogućilo proizvodnju aluminijske legirane za komercijalnu upotrebu. Tada je potencijalno široku upotrebu ograničavala cijena aluminijske legirane koja je bila slična cijeni zlata. [2]

Elektrolizom aluminijevog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  – glinica), koju su nezavisno jedan od drugog 1886. razvili Charles Hall u Ohio-u te Paul Heroult u Francuskoj, počinje rasti zanimanje za industrijsku primjenu aluminijske legirane. [4]

Suvremena proizvodnja aluminijske legirane se bazira na mineralnom materijalu boksitu. Pri proizvodnji se primjenjuje više metoda, ali najčešća je primjena metode po Bayeru (1889.g.). Ruda boksita se čisti od primjesa u otopini natrijeve lužine pod tlakom. Žarenjem se očišćeni boksit pretvara u  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (glinicu) koja se podvrgava elektrolizi. Pri elektrolizi aluminij se taloži na katodi te pada na dno. Daljnje pročišćavanje vrši se pretaljivanjem aluminijske legirane u električnim pećima. Pretaljivanjem zaostale primjese ispare ili isplivaju na površinu te dobivamo aluminij određene čistoće. [2]

Rezultirajući čisti aluminij je relativno slabe čvrstoće i kao takav se rijetko koristi. Za povećanje čvrstoće čisti aluminij je generalno legiran s metalima poput bakra, mangana, magnezija, silicija te cinka. [3]

## 1.2. Svojstva aluminija

Jedinstven splet svojstva aluminija i njegovih legura čine aluminij jednim od najsvestranijih, ekonomičnijih te opće privlačnih metalnih materijala za širok spektar implementacije.

Tri su glavna svojstva koja određuju primjenu aluminija kao inženjerskog materijala: [1]

- a) Povoljan omjer čvrstoće i gustoće ( $R_m/\rho$  je tzv. specifična čvrstoća) posebno kad se koristi u obliku neke od svojih legura. Gustoća aluminija je oko jedne trećine gustoće čelika pa se aluminij i njegove legure prvenstveno koriste u proizvodnji zrakoplova i vozila, ali i za druge primjene. Legiranjem i precipitacijskim očvršnućem mogu se proizvesti legure koje imaju specifičnu čvrstoću kao i mnogi čelici.
- b) Omjer električne vodljivosti i gustoće najpovoljniji je među svim metalima. Zbog toga aluminij istiskuje bakar iz upotrebe za prijenos električne energije.
- c) Aluminij ima velik afinitet prema kisiku, a korozijska postojanost mu je ipak relativno velika i na njoj se zasniva široka primjena aluminija u graditeljstvu.

Mala gustoća uparena s visokom čvrstoćom pojedinih aluminijskih legura dopušta projektiranje laganih, ali čvrstih konstrukcija što se posebice odnosi na konstrukcije u pokretu, poput: svemirskih letjelica, zrakoplova te svih tipova kopnenih i morskih vozila. [4]

Uz navedena svojstva aluminij ima vrlo dobru toplinsku i električnu vodljivost, reflektivna svojstva, visoku žilavost, dobru obradivost, magnetski je neutralan, a neotrovnost i bezbojnost njegovih korozijskih produkata omogućuje mu upotrebu u kemijskoj i prehrambenoj industriji. [2]

Njegova se antikorozivnost temelji na postojanju gustog nepropusnog oksidnog sloja koji se stvara na površini metala na zraku i vodenim otopinama. Prirodni oksidni sloj je debeo tek oko  $0,01 \mu\text{m}$  i pun je sitnih pora. Ukoliko se oksidni sloj ošteti, odmah se oksidacijom nadomješta novim. Aluminij je neotporan na tvari koje razaraju zaštitni oksidni sloj. To su u prvom redu lužine koje ga otapaju u koncentriranom stanju. [1]

Aluminij tipično ima vrlo dobru toplinska i električna vodljivost, a i razvijene su određene legure s većim stupnjem električnog otpora. Takve legure primjenu nalaze u elektromotorima s visokim okretnim momentom. [4]

Električna vodljivost iznosi 62% IACS. Računajući masu za masu aluminij je bolji vodič od bakra i istiskuje ga iz upotrebe u elektrotehnici tamo gdje ne smeta veći volumen materijala i gdje se ne zahtjeva dobra lemljivost. [1]

**Tablica 1. Usporedba osnovnih svojstava aluminijevih legura i konstrukcijskih čelika [12]**

Svojstva	Aluminijeve legure	Konstrukcijski čelici
Gustoća [ $\text{kg/m}^3$ ]	2700	7850
Youngov modul elastičnosti [MPa]	72000	205000
Toplinska vodljivost [ $\text{W/mK}$ ]	235	79
Temperatura taljenja [ $^{\circ}\text{C}$ ]	550 - 650	~ 1500
Temperatura otapanja oksida [ $^{\circ}\text{C}$ ]	2060 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	800 – 900 ( $\text{FeO}$ , $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )
Električna vodljivost [ $\Omega \text{ cm}$ ]	~ $2,65 \cdot 10^{-6}$	~ $10 \cdot 10^{-6}$
Relativna magnetska permeabilnost	< 1 (paramagnetičan)	80 – 160 (feromagnetičan)
Kristalna struktura	Jednofazni (FCC)	BCC - FCC

Aluminij ispunjava zahtjeve velike električne vodljivosti i čvrstoće primjenom u dugometražnim, visokonaponskim vodovima s čeličnom jezgrom. Toplinska vodljivost aluminija je 50-60% toplinske vodljivosti bakra. Ta karakteristika mu omogućuje primjenu u izmjenjivačima topline, isparivačima, električni grijanim uređajima te npr. za automobilske glave cilindra. Aluminij je paramagnetičan materijal što je svojstvo bitno za električnu i elektroničku industriju. Nije piroforan što je bitno pri primjeni sa zapaljivim i eksplozivnim materijalima. [4]

Lakoća kojom je moguće obraditi ili oblikovati aluminij se smatra njegovom velikom odlikom. S kubično plošno centriranom strukturom (FCC) aluminij je metal izvanredno toplo i hladno oblikovljiv deformiranjem.

Postupcima isprešavanja mogu se proizvoditi profili vrlo složenih oblika za raznovrsne namjene. Valjanjem se mogu proizvoditi folije od samo nekoliko  $\mu\text{m}$  debljine koje se upotrebljavaju za pakiranje niza industrijskih i prehrambenih proizvod. Kako smo već spomenuli, nelegirani aluminij je relativno mekan s niskom vlačnom čvrstoćom te se za inženjersku primjenu upotrebljava u pravilu u legiranom stanju. [1]

### 1.3. Aluminijske legure

Aluminijske legure prigodno je podijeliti prema tehnologiji preoblikovanja u dvije velike skupine: gnječene i lijevanje legure. [4]

Lijevene legure se podjednako dobro oblikuju s osnovne tri metode: lijevanjem u pijesak, lijevanjem u kokile ili tlačnim lijevanjem, dok se gnječene legure prvo lijevaju u ingote ili šipke koje se zatim toplo ili hladno deformiraju željenim postupkom. [2]

Legiranje ima za cilj prvenstveno poboljšanje mehaničkih svojstava, ponajprije vlačne čvrstoće i tvrdoće, zatim krutosti, rezljivosti, katkada žilavosti i livljivosti. Najvažniji legirni elementi su: bakar (Cu), magnezij (Mg), silicij (Si), cink (Zn) i mangan (Mn). Kao dodaci i primjese (nečistoće) prisutni su u manjoj količini željezo (Fe), krom (Cr) i titan (Ti). [1]

Bakar (Cu) kao legirni element povećava čvrstoću i tvrdoću aluminijske legure. Uz njegovu prisutnost raste obradivost, ali smanjuje se korozijska postojanost te kod određenih legura povećava osjetljivost na napetosnu koroziju. [5]

Legiranje aluminija magnezijem (Mg) pridonosi značajnom povećanju čvrstoće, korozijske postojanosti i zavarljivosti te poboljšanju karakteristika aluminija za hladno oblikovanje. [5]

Silicij (Si) je jedan od najvažnijih legirnih elemenata lijevanih aluminijskih legura. Primarno je odgovoran za dobru livljivost aluminijskih legura te ga nadalje odlikuje niska gustoća ( $2,34 \text{ g/cm}^3$ ) što može biti prednost kod potrebe za smanjenom masom aluminijske legure. Slabo je topiv u aluminiju stoga precipitira kao čist silicij, što leguru čini tvrdom te joj daje veću otpornost ka abrazivskom trošenju. Također smanjuje i koeficijent termičke dilatacije Al-Si legura. Negativna posljedica legiranja aluminija silicijem je smanjena obradivost legura. [5]



### **1.3.1. Označavanje aluminijevih legura**

#### *1.3.1.1. Označavanje gnječenih aluminijevih legura*

Gnječene aluminijeve legure se označavaju prema europskoj normi EN 573, a način označavanja slijedi: [7]

- EN - za standardne materijale, slijedi slobodno mjesto
- Slovo A - predstavlja aluminij
- Slovo W - gnječeni materijal
- Sastav legure specificiran je:
  - a) brojčanom oznakom - 4 znaka (npr. 5754)
  - b) slovno-brojčanom oznakom- kemijskim simbolima (npr. Al Mg3)
- ovaj dio oznake odijeljen je crticama od ostatka oznake (-)

Slijedi slovo i/ili broj kojim je definirana toplinska obrada gnječene Al-legure(EN 515):

- a) F - primarno (isporučeno) stanje - mehanička svojstva nisu specificirana
- b) O - žareno stanje – u svrhu smanjenja čvrstoće
- c) H - očvrsnuto hladnom deformacijom
- d) W - rastopno žareno (homogenizirano) stanje
- e) T - rastopno žareno i dozrijevano (precipitacijski očvrsnuto stanje)

Primjer a): EN AW 5754-O

Primjer b): EN AW Al Mg3-O

U tablici 2. možemo vidjeti numeričke oznake gnječenih aluminijevih legura pri čemu prva znamenka ukazuje na osnovni legirni element, druga znamenka na modifikaciju osnovne legure ili njezinu čistoću, a treće i četvrto mjesto pobliže definiraju Al-leguru ili ukazuju na čistoću aluminija. [5]

**Tablica 2. Numeričke oznake gnječenih Al legura [5]**

Aluminij $\geq 99,00\%$	1xxx
Aluminijeve legure prema osnovnom legirnom elementu	
Bakar	2xxx
Mangan	3xxx
Silicij	4xxx
Magnezij	5xxx
Magnezij i silicij	6xxx
Cink	7xxx
Ostali elementi	8xxx
Neiskorištena serija	9xxx

#### 1.3.3.2. Označavanje lijevanih aluminijevih legura

Lijevane aluminijeve legure se označavaju prema europskoj normi EN 1780, a način označavanja slijedi: [7]

- EN - za standardne materijale, slijedi slobodno mjesto
- Slovo A - reprezentira aluminij
- Slovo C - lijevani proizvod
- Sastav legure specificiran je:
  - a) brojčanom oznakom (5 znakova)
  - b) slovno-brojčanom oznakom (kemijskim simbolima)
- ovaj dio oznake odijeljen je crticama od ostatka oznake

---

Slijedi slovo i/ili broj kojim je definiran postupak lijevanja i/ili toplinska obrada.

Prvo slovo poslije oznake kemijskog sastava (brojčane ili kemijskim simbolima) ukazuje na primijenjeni postupak lijevanja: [7]

- a) D - tlačno lijevanje
- b) K - lijevanje u trajne kalupe ili kokile
- c) L - precizni ili točni lijev
- d) S - lijevanje u pješčane kalupe

Poslije oznake primjenjenog postupka lijevanja slijedi oznaka za stanje lijevanih aluminijskih legura (EN 1706): [7]

- a) F - lijevano, toplinski neobrađeno
- b) O - žareno
- c) T1 - kontrolirano hlađeno pri skrućivanju i prirodno dozrijevano
- d) T4 - rastopno žareno i prirodno dozrijevano
- e) T5 - kontrolirano hlađeno pri skrućivanju i umjetno dozrijevano ili pre-dozrijevano
- f) T6 - rastopno žareno i umjetno dozrijevano
- g) T64 - rastopno žareno i umjetno pod-dozrijevano
- h) T7 - rastopno žareno i umjetno pre-dozrijevano (stabilizirano)

Primjer: (EN 1706) AC 42100-KT6 [7]

**Tablica 3. Numeričke oznake osnovnih 11 podskupina lijevanih Al legura [5]**

bakar (Cu)	2xxxx	21xxx	AlCu
silicij (Si)	4xxxx	41xxx	AlSiMgTi
		42xxx	AlSi7Mg
		43xxx	AlSi10Mg
		44xxx	AlSi
		45xxx	AlSi5Cu
		46xxx	AlSi9Cu
		47xxx	AlSi(Cu)
		48xxx	AlSi5CuNiMg
magnezij (Mg)	5xxxx	51xxx	AlMg
cink (Zn)	7xxxx	71xxx	AlZnMg

### 1.3.2. Gnječene aluminijeve legure

Osnovna podjela gnječenih aluminijevih legura temelji se na kemijskom sastavu i mogućnosti precipitacijskog očvršnuća. Prema tome kriteriju postoje gnječene aluminijeve legure koje očvršćuju hladnim deformiranjem i precipitacijski (toplinski) očvrstljive. [1]

Uz prethodnu podjelu komercijalne gnječene aluminijeve legure su u osnovi podijeljene u pet skupina prema postupku izrade te geometrijskim specifikacijama. One su: [5]

- pločasti valjani proizvodi (limovi, ploče i folije...)
- šipke, žice
- cijevi
- kovani proizvodi
- razni oblici

Od legura koje očvršćuju hladnim deformiranjem zahtijeva se dovoljna čvrstoća i krutost u hladnom stanju, kao i dobra korozijska postojanost. Većina ovih legura ima mikrostrukturu koja se potpuno sastoji od čvrste otopine.

To je dodatni faktor u prilog njihovoj velikoj duktilnosti i velikoj korozijskoj postojanosti. Željena mehanička svojstva postižu se stupnjem ugnječenja primijenjenim u zadnjoj fazi hladnog oblikovanja deformiranjem. [1]

Glavni im je nedostatak u tome da se mehanička svojstva materijala, proizvedenog na konačne dimenzije, ne mogu više mijenjati osim mekšanja postupkom žarenja. [1]

Precipitacijski očvrstljive aluminijske legure imaju prednost kada se traži povoljan omjer čvrstoće i gustoće. Osnovu precipitacijski očvrstljivih legura čine legirni elementi bakar, magnezij, cink i silicij koji stvaraju intermetalne spojeve s aluminijem (bakar) ili međusobno (magnezij, silicij i cink). [1]

Osnovne skupine gnječenih aluminijskih legura su:

- Al-Mg-Si legure (6xxx serija) koja sadrži odgovarajući udio magnezija i silicija kako bi se formirao magnezijev silicid ( $Mg_2Si$ ) koji ih čini precipitacijski očvrstljivim. [5] Ove legure su otporne na koroziju, uvjetno pogodne za zavarivanje, anodizaciju i poliranje. [1]
- Al-Cu-Mg legure (2xxx serija) su legure kod kojih je bakar glavni legirni element uz magnezij kao sekundarni dodatak. Ova serija nema toliko dobru korozijsku postojanost kao većina aluminijskih legura te pod određenim uvjetima podliježe interkristalnoj koroziji. [5]

Uzrok tome je povećani udio bakra. Dok dodatak magnezija ubrzava očvršnuće stvaranjem intermetalnih spojeva. [1]

- Al-Zn-Mg (7xxx serija) ne dosežu potpunu čvrstoću Al-Cu-Mg legura, ali su zato otpornije od ovih na kemijske utjecaje. Predstavljaju dobar kompromis glede čvrstoće i korozijske postojanosti i uz to im je zavarljivost zadovoljavajuća ( $AlZn_4Mg_1$ ). [1]

### ***1.3.3. Lijevane aluminijske legure***

Lijevane legure mogu se svrstati u tri osnovne grupe: Al-Si, Al-Mg, Al-Cu čijom se kombinacijom mogu dobiti legure s poboljšanim nekim od osnovnih svojstava. [1]

- Al-Si legura („silumin“) (4xxxx serija) osnovni element koji doprinosi dobroj livljivosti aluminijskih legura je silicij (do 12%) pa je ova skupina legura najrasprostranjenija u skupini lijevanih aluminijskih legura. [1]

Dodavanjem silicija moguće je značajno smanjiti talište bez pojave krhkosti u leguri. Upravo zbog tog razloga se iz legure Al-Si proizvode žice za zavarivanje te se koriste za lemljenje pri spajanju aluminijske legure, jer ispunjavaju odgovarajuću potrebu za nižim talištem od baznog materijala. [5]

- Al-Mg (5xxxx serija) legura karakterizira dobra korozijska postojanost zbog čega se kod ovih legura može postići visoki sjaj. Nažalost, ona je jedna od najteže livljivih legura zbog pojave poroznosti, stvaranja troske i loše žilavosti. [1]

Uz dobru korozijsku postojanost potrebno je naglasiti da posebnu pažnju valja pridati količini operacija hladnog deformiranja i temperaturama kojim će u radnoj okolini legura biti izložena (Al-Mg legure s preko 3,5% Mg se mogu koristiti na temperaturi većoj od 65 °C) kako bi se izbjeglo puknuće uslijed napetostne korozije. [5]

- Al-Cu legure (2xxxx serija) su toplinski očvrstljive legure s osrednje visokom čvrstoćom, srednjom ili slabom udarnom otpornošću, dobro otporne na višim temperaturama i dobro rezljive. Nedostatak im je slaba livljivost te najslabija korozijska postojanost među svim aluminijskim legurama. [1]

Sastav lijevanih aluminijskih legura je sličan sastavu gnječanih. Dok se kod gnječanih očvršćivanje i željena svojstva postižu dodatkom legiranih elemenata te kroz toplinsku obradu za lijevanje je od veće važnosti upotreba odgovarajućih legiranih elemenata. [6]

#### **1.4. Primjena aluminijskih legura u brodogradnji**

Mala gustoća, odlična mehanička svojstva i korozijska postojanost aluminijskih legura čini ih pogodnim za upotrebu u brodogradnji i u pomorskim konstrukcijama. Već 1890. -tih, s početkom razvoja industrijske primjene aluminijske legure, izgrađena su prva plovila. U Francuskoj, bogati aristokrat i jedriličar, Comte Jacques de Chabannes de la Palice investirao je u izgradnju prvog aluminijskog plovila u povijesti „Le Vendenesse“. Plovilo je građeno u Parizu te je porinuto 1893. godine. „Le Vendenesse“ je bilo plovilo dužine 17,4 m, istisnine od 15 tona, vanjska oplata izrađena od aluminijskog lima debljine 2 mm spojenog zakovicama na čelični okvir. Takva konstrukcija je omogućila uštedu od 40% mase trupa. Već 1895. godine izgrađen je ruski torpedni čamac „Sokol“ duljine 58 m pokretan motorom snage 3000 kW s maksimalnom mogućom brzinom od 32 čvora. [8]

Predstavljanjem gnječenih Al-Mg legura (5xxx serija) 1920. –tih dolazi do značajnije upotrebe aluminijskih legura kao konstrukcijskog materijala u brodogradnji. [9]

Uz predstavljanje novih aluminijskih legura, konferencija održana u Washingtonu 1922. godine, na kojoj su definirana određena ograničenja što se tiče mase te istisnine brodova, je svakako pogodovala proširenju konstrukcijske upotrebe aluminijskih legura. [8]

Iz tablice 4. usporedbom dvaju brodova dužine 110 m izrađenih potpuno od aluminija i od čelika s aluminijskom nadgradnjom možemo vidjeti da brod izrađen od aluminija 34% mase broda izgrađenog od čelika s aluminijskom nadgradnjom. [8]

**Tablica 4. Usporedba mase (u tonama) elemenata izrađenih od čelika ili aluminija [8]**

	Aluminijski brod	Čelični brod (*)
Trup [t]	280	504
Nadgradnja [t]	70	70
Suma ( $\Sigma$ ) [t]	350	574
Izolacija [t]	60	40
Ličenje [t]	5	15
Ukupno [t]	415	629
Ušteda u masi [t]	214	

(\*) Čelični trup i aluminijska nadgradnja

Od 1960. –tih aluminijske legure su primjenu pronašle u širokom spektru pomorskih konstrukcija, poput: [8]

- Putnički brodovi velikih brzina
- Brodice i jedrilice
- Teretne brodove
- Ribarske brodove
- Pomorske platforme
- Obalne instalacije i marine
- Specijalne konstrukcije

### 1.4.1. Primjena gnječenih aluminijskih legura u brodogradnji

Neke od gnječenih aluminijskih legura koje se upotrebljavaju pri proizvodnji trupa broda su ploče i limovi numeričkih oznaka 5083, 5086, 5454 i 5456 te odnedavno 5059 i 5383. Ove se legure koriste u žarenom stanju (oznaka za toplinsku obradu – O), a kada se zahtjeva veća čvrstoća koriste se očvrstnute hladnom deformacijom (H) poput H116 ili H321. [9]

Iznad i ispod palube u upotrebi su aluminijske legure serije 6xxx (Al-Mg-Si) u precipitacijski očvrstnutom stanju, najčešće u ekstrudiranom ili obliku lima te legure serije 5xxx u oblik limova ili ploča. Ekstrudiranje serije legura 5xxx nije često, ali neki su proizvodi dostupni za upotrebu u pomorskim konstrukcijama. Ekstrudirane legure serije 6xxx kompleksnih poprečnih presjeka imaju široku primjenu kod raznih brodskih konstrukcija, pregrada, rebara, poprečnih greda, namještaja, stepeništa itd. [9]

Aluminijske legure, posebice legure serija 5xxx i 6xxx, je moguće podvrgnuti niskim temperaturama bez značajnih promjena mehaničkih svojstava. Stoga aluminijske legure pronalaze i mogućnost upotrebe u plovilima namijenjenim morima polarnih regija.

Primjer promjena mehaničkih svojstava aluminijske legure numeričke oznake 5083 u žarenom stanju (O) između temperatura -196 °C do +200 °C prikaza je u tablici 5. Bitno je napomenuti da sposobnost aluminijskih legura za elastičnom deformacijom ne pada pri kriogenim temperaturama te da produženo držanje pri niskim temperaturama ne mijenja njihova svojstva pri vraćanju na temperature okoline. [8]

**Tablica 5. Promjena mehaničkih svojstava aluminijske legure numeričke oznake 5083 u žarenom stanju (O) između temperatura -196 °C do +200 °C [8]**

Temperatura °C	$R_m$ [MPa]	$R_{p0.2}$ [MPa]	A [%]
- 196	390	140	34
- 80	280	120	26
- 28	270	120	24
+ 20	270	120	22
+ 100	270	120	26
+ 150	210	110	35
+ 200	155	105	45



Mehanička svojstva aluminijevih legura na temperaturama iznad 100 °C ovise o visini temperature te o vremenu držanja na određenoj temperaturi. Kako temperatura raste vlačna čvrstoća  $R_m$  i konvencionalna granica razvlačenja  $R_{p0,2}$  se smanjuju dok istezljivost A% raste. [8]

Izvođenje toplih plastičnih deformacija na određenim gnječenim aluminijevim legurama (5083, 5086, 6082 i 6061) dovodi do značajnog pada mehaničkih svojstava posebice kod serije 6xxx u T5 ili T6 (rastopno žareno i dozrijevano) stanju. [8]

#### ***1.4.2. Primjena lijevanih aluminijevih legura u brodogradnji***

Lijevane aluminijeve legure koje se koriste u brodograđevnim konstrukcijama pripadaju isključivo 4xxxx (Al-Si) i 5xxxx (Al-Mg) seriji. Legure serije 2xxxx (Al-Cu) se nastoje izbjegavati za upotrebu u pomorskoj okolini, izuzev ako nisu vrlo dobro zaštićene. [8]

Za Al-Si lijevanje legure preporučuju se: [8]

- Legura 41000 za komponente od kojih se očekuje lijep izgled nakon mehaničkog poliranja i anodiziranja.
- Legure 42100 i 42200 za kompleksne komponente za koje se potražuju visoka mehanička svojstva. Ove legure moraju očvrnuti dozrijevanjem kako bi prikazala ta željena visoka mehanička svojstva.
- Legura 44100 za tanke i vitke tvrdo lijevane komponente.

Za Al-Mg lijevanje legure preporučuju se: [8]

- Legura 51100 s 3% magnezija
- Legura 51300 s 6% magnezija

U tablici 6. možemo vidjeti određene bitne karakteristike preporučenih lijevanih aluminijevih legura za brodogradnju te iz toga pretpostaviti svrhu njihove primjene u konstrukciji broda.

**Tablica 6. Prikaz prigodnosti inženjerske upotrebe preporučenih lijevanih aluminijskih legura [8]**

Legura	Livljivost	Osjetljivost na pukotine	Tanke komponente	Dimenzijska stabilnost	Obradivost	Zavarljivost (TIG, MIG)	Poliranje	Anodiziranje zbog zaštite	Anodiziranje zbog dekoracije	Otpornost na koroziju u morskoj okolini
41xxx	2	2	2	3	3	3	4	4	4	3
421xx	3	3	4	3	2	3	3	4	0	3
422xx	3	3	4	2	3	3	3	4	0	3
441xx	4	4	4	4	1	4	2	4	0	3
511xx	2	1	1	3	4	4	4	4	4	4
513xx	2	1	2	3	4	4	4	4	3	4

0 – neprikladno, 1 – loše, 2 – prosječno, 3 – dobro, 4 – odlično

## 2. ZAVARIVANJE ALUMINIJA I ALUMINIJEVIH LEGURA

Prvi pokušaji zavarivanja aluminija su bili 1904. godine postupkom plinskog zavarivanja. Taj je postupak sve do ranih 1960.-tih je bio jedini postupak zavarivanja aluminijevih legura, što je ograničavalo poziciju zavarivanja u horizontalom položaju te omogućavalo spajanje samo tankih limova. [8]

Godinama se prisutnost tankog prirodnog oksidnog sloja na površini aluminija smatrala najvećom preprekom ka uspješnom zavarivanju ovog metala. Kako bi zavarivanje bilo uspješno potrebno je ukloniti taj tanki oksidni sloj te spriječiti njegovo ponovno formiranje štiteći rastaljeni metal od okolne atmosfere. [8]

Tanki oksidni sloj ili aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) je sloj koji aluminiju daje odličnu korozijsku otpornost. Razlog zbog kojeg je potrebno ukloniti sloj aluminijevog oksida je taj što je njegovo talište na 2060 °C dok je talište aluminija na 660 °C. Stoga možemo zaključiti da će zagrijavanje aluminija do njegove točke tališta rezultirati rastaljenim aluminijem zatvorenim ispod postojanog sloja oksida. [3]

Kako i kod elektrolučnog zavarivanja čelika tako i kod aluminija, pojava i razvoj žica obloženih praškom od 1925. godine nadalje omogućila je zavarivanje debljih proizvoda. Jedna od prvih poznatih primjena elektrolučnog zavarivanja žicom obloženom praškom je bila za izgradnju željezničkog vozila u Francuskoj 1934. godine. Vozilo je bilo izgrađeno iz legure EN AW 5056, ali nastavak razvoja procesa nije postigao značajan opseg zahvaljujući neispunjenom zahtjevu kvalitete zavara. [8]

Prvi pokušaj zavarivanja pod zaštitnim plinom (argon/helij) 1930.-tih predstavlja velik korak unaprijed. Posebice zbog eliminacije praška i njegove prateće opasnosti od korozije te mogućnosti zavarivanja u svim položajima i velikim brzinama. Industrijski razvoj TIG i MIG postupka ranih 1950.-tih godina te napredak i poboljšanja tih postupaka koja traju sve do danas. Primjerice jedna takva inovacija s početka 1990.-tih godina je elektronički upravljano impulsno MIG zavarivanje. [8]

Aluminijeve legure se u konstrukcijama brodova počinju upotrebljavati ranih 1960.-tih. te je pritom važno spomenuti da se tehnologija spajanja izvodila pomoću zakovica kao i kod čeličnih brodova tog razdoblja.

Jedrilica „MoragMhor“ dugačka otprilike 21 m izrađena od Al-Mg legure (4-5% magnezija) je prvi znani brod izrađen MIG postupkom zavarivanja godine 1953. [8]

## **2.1. Zavarljivost aluminija**

Idealni zavareni spoj, time obuhvaćajući metal zavora, zonu utjecaja topline (ZUT) te obližnji osnovni materijal, mora imati ista svojstva kao i sam osnovni materijal. Međutim javljaju se određeni problemi pri zavarivanju aluminija i njegovih legura koji otežavaju postizanje tog idealnog zavarenog spoja. Značajke i defekti koji najčešće doprinose i pokazuju gubitka svojstava obuhvaćaju slijedeće: [3]

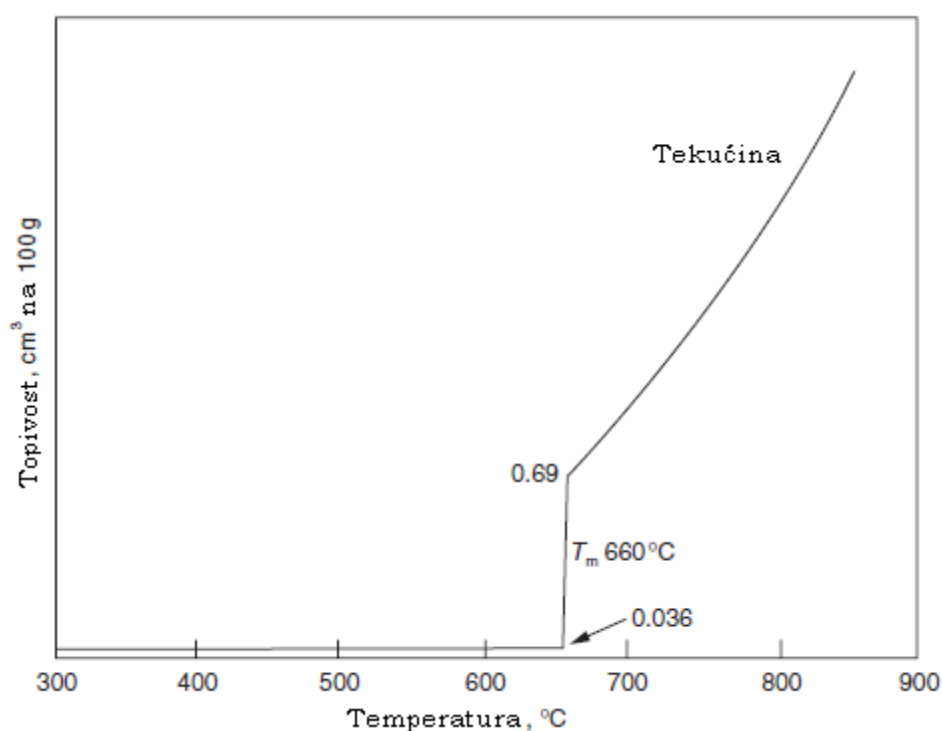
- poroznost
- uklanjanje oksidnog sloja
- tople pukotine
- reducirana čvrstoća u području zavora i zone utjecaja topline
- slaba difuzija
- reducirana korozijska otpornost
- reducirana električna otpornost

### **2.1.1. Poroznost**

Poroznost je problem ograničen na materijal zavora. Uzrokovana je otopljenim i zarobljenim plinom (vodik) u talini zavarenog metala koji tijekom hlađenja ostaje zarobljen u obliku mjehurića u ohlađenom i skrutnutom metalu. [3]

Ona je „osnovna“ i uvijek prisutna nepravilnost kod zavarivanja aluminija i legura. Topljivost vodika naglo raste iznad temperature taljenja, što je lijepo vidljivo na slici 1. [11]

Jedan od glavnih izvora vodika je aluminijev oksid, koji je porozan te apsorbira vlagu. Istraživanja su pokazala da ukoliko se zona spoja temeljito čisti, osnovni uzrok poroznosti je vodik unesen elektrodnom žicom. [11]



**Slika 1. Grafički prikaz topljivosti vodika u aluminiju [3]**

Od konvencionalnih zavarivačkih postupaka za aluminij, TIG pokazuje manju podložnost poroznosti u usporedbi s MIG-om, upravo zbog kontaminacije elektrodne žice vodikom. [3]

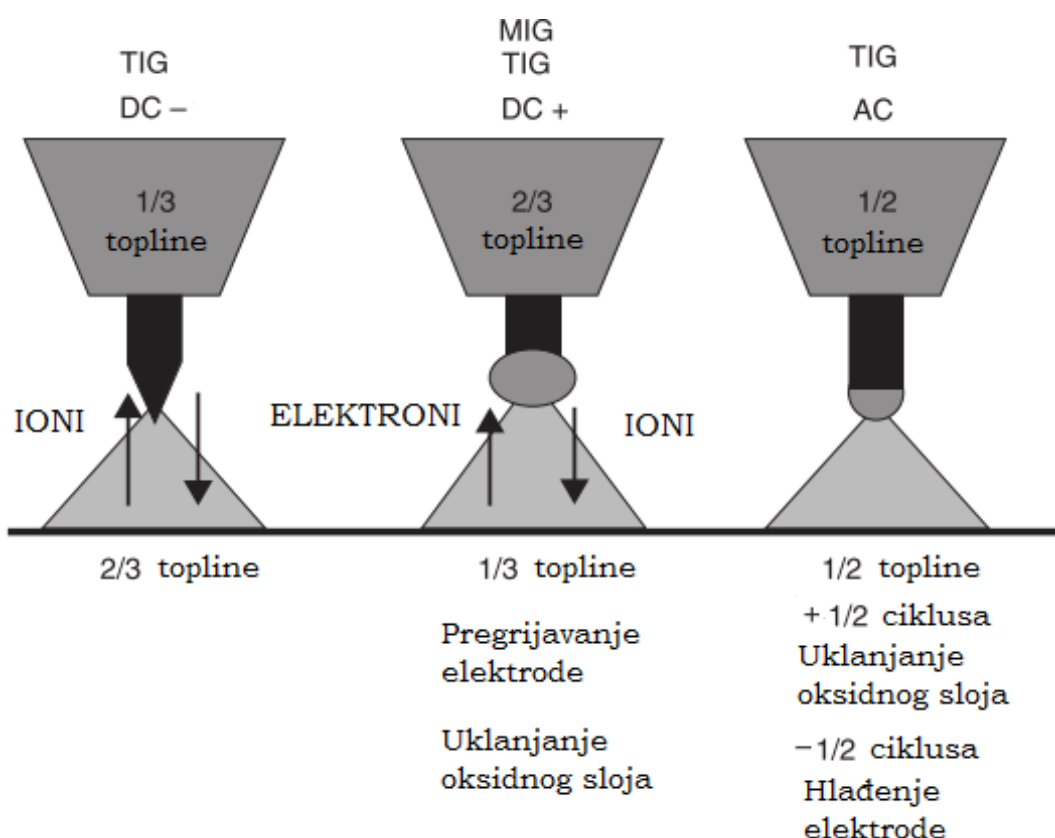
Čistoća osnovnog materijala je od velike važnosti za postizanje manjih razina poroznosti. Odmašćivanje, potom mehaničko čišćenje, npr. četkom od nehrđajućeg čelika, kako bi se uklonio oksidni sloj slijedi zavarivanje u preporučeno kratkom razdoblju od završetka čišćenja. Izbjegavanje poroznosti kada je vodik prisutan u osnovnom materijalu je nemoguće izbjeći. [3]

### **2.1.2. Uklanjanje oksidnog sloja**

Kako je već spomenuto, aluminijev oksid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) je sloj koji aluminiju daje odličnu korozijsku otpornost. Posjeduje izrazito veliku temperaturu taljenja,  $2060\text{ }^\circ\text{C}$  u usporedbi s temperaturom taljenja aluminija od  $660\text{ }^\circ\text{C}$  što pri zagrijavanju aluminija do njegove točke tališta rezultirati rastaljenim aluminijem zatvorenim ispod postojanog sloja oksida.

Taj sloj oksida mora biti uklonjen prigodnim postupkom. Postupci poput procesa s praškom, lemljenja, tvrdog lemljenja, REL-a, zavarivanja pod troskom su rijetko korišteni. Prašak mora biti iznimno agresivan kako bi uklonio taj oksidni sloj te zahtjeva dodatno uklanjanje potencijalno korozijski opasnog zaostalog praška. Na sreću, kod elektrolučnog zavarivanja taljivom žicom pod zaštitnim plinom postoji fenomen zvan katodno čišćenje čijom implementacijom možemo postići željene rezultate. Spajajem elektrode, koja je ujedno i taljiva žica, na pozitivan pol izvor struje dolazi do toka istosmjerne struje te ionskog bombardiranja površine radnog dijela. Po prestanku ionskog bombardiranja površine radnog dijela dobivamo površinu aluminija očišćenu od oksidnog sloja što omogućuje difuziju taline dodatnog materijala s osnovnim materijalom. [3]

Kod MIG postupka zavarivanja isključivo se koristi istosmjerni izvor struje (DC) s elektrodom spojenom na pozitivan pol, jer spajanje elektrode na negativan pol rezultira nestabilnim električnim lukom, nepravilnim prijenosom metala te lošom kvalitetom zavora. Za TIG postupak se konvencionalno koristi istosmjerni izvor struje s elektrodom spojenom na negativan pol što pri zavarivanju aluminija može uzrokovati lošu kvalitetu zavora. Dok upotrebom elektrode spojene na pozitivan pol dolazi do pregrijavanja volframove elektrode do mjere gdje 60-70% topline generirane kod TIG postupka rezultat pregrijavanja elektrode spojene na pozitivan pol. To pregrijavanje volframove elektrode može uzrokovati njeno otapanje. Kompromis je stoga upotreba izmjenične struje (AC) gdje se uklanjanje sloja oksida odvija tijekom pozitivnog dijela ciklusa dok se hlađenje elektrode odvija tijekom negativnog dijela ciklusa kako je ilustrirano na slici 2. [3]



Slika 2. Ponašanje elektrode ovisno o vrsti struje i polu spajanja [3]

### 2.1.3. Tople pukotine

Osnovni problem kod zavarivanja su solidifikacijske ili tople pukotine. Taj je problem karakterističan za čiste metale, ali i za neke legure. Nije isključivo vezan za aluminijeve legure već se pojavljuje i kod čeličnih, niklovi te bakrovih legura. [3]

Kod zavarivanja Al-Si legura pukotinska je osjetljivost izražena kod sadržaja Si oko 0,5 - 2%. Preko 3% Si, osjetljivost relativno niska. Kod zavarivanja Al-Cu legura, izražena je osjetljivost kod sadržaja Cu oko 1,5 -3,5%, preko 6% Cu je relativno niska. Magnezij u količini 0.5-3.0% čini metal zavara osjetljivim na pukotine. Također uz sadržaj manji od 2,8% Mg, Al-Mg legura može se zavariti sa Al-Si (4xxx) žicom ili Al-Mg (5xxx) žicom, ovisno o zahtijevanim performansama. Ako legura ima više od 2,8% Mg, ne može se normalno zavariti Al-Si žicom, jer se tvori suviše  $Mg_2Si$ , koji smanjuje žilavost i povisuje osjetljivost na pucanje.

Oprez je potreban kod zavarivanja Al-Mg-Si legura gdje je dopušteno do 1%  $Mg_2Si$  zbog osjetljivost na pucanje. Stoga je potrebno koristiti dodatne materijale Al-Si ili Al-Mg serije. [11]

Neki od načina na koje je moguće izbjeći tople pukotine su: [3]

- Smanjene veličina kristalnog zrna. Pokazano je da mali dodatak titana, cirkonija ili skandija služi kao jezgra za razvoj finog, sitnog kristalnog zrna tijekom solidifikacije.
- Kontrola sastava taline zavara dodavanjem odgovarajućeg dodatnog materijala
- Primjena odgovarajuće pripreme spoja kako bi se omogućilo dovoljno i uspješno dodavanje dodatnog materijala.
- Zavarivanje najvećom mogućom brzinom. Velike brzine reduciraju vrijeme pri kojem je zavar u rasponu visokih temperatura koje pogoduju stvaranju toplih pukotina.
- Izbor zavarivačkog postupaka te montažnog niza koji minimalizira zaostala naprezanja
- Upotrebom vanjske sile koja osigurava kompresiju zavara u rasponu visokih temperatura koje pogoduju stvaranju toplih pukotina.
- Izbor dodatnog materijala s točkom tališta približno jednakoj onoj osnovnog materijala.

#### **2.1.4. Redukcija čvrstoće zavara i zone utjecaja topline**

Kako bi se komponente spojile zavarivanjem potrebno je mjesto spoja, koji je prethodno odgovarajuće pripremljen, zagrijati do visoke temperature, najčešće temperature taljenja osnovnog materijala. Područja zavarenog spoja mogu se podijeliti u tri distinktivne zone – zona materijala zavara, zona utjecaja topline i nepromijenjen osnovni materijal. [3]

Kako zona utjecaja topline doživljava jedan ili više ciklusa zagrijavanja i hlađenja njena svojstva mogu biti radikalno drugačija od onih nepromijenjenog osnovnog materijala. Takav je slučaj čest s aluminijevim legurama koje očvršćavaju hladnim deformiranjem ili precipitacijskim očvršćivanjem.



Bitan je faktor velika širina zone utjecaja topline kod pojedinih aluminijevih legura uzrokovana njihovom velikom toplinskom vodljivošću te posljedice te velike širine u kojoj dolazi do značajnog smanjenja čvrstoće. Iznimke kod kojih svojstva zone utjecaja topline odgovaraju svojstvima osnovnog materijala su vidljive samo kod netretiranih lijevanih ili legura u žarenom stanju. [3]

Malo je toga što se može učiniti kako bi se poboljšala svojstva metala zavara. Očvršćivanje uslijed otopljenih atoma u krutoj otopini te izbor prigodnog odgovarajućeg dodatnog materijala mogu značajno doprinijeti većoj čvrstoći metala zavara. Kao problem u zoni utjecaja topline, ali i u metalu zavara, javlja se potencijal za gubitkom legiranih elemenata kao npr. magnezija s niskom točkom vrenja ili pak litija kao iznimno reaktivnog s kisikom, što ih čini sklonim nestajanju. Iako, nedostatak kvantificiranih informacija uskraćuje mogućnost opažanja tog problema kao značajnog. [3]

## **2.2. Postupci zavarivanja aluminijevih legura primjenjivi u brodogradnji**

Aluminijsko plovilo je, najčešće, izgrađeno od komponenti prethodno izrezanih (poput aluminijских limova ili ploča) ili oblikovanih (poput ekstrudata) koji su zatim zavareni određenim postupcima u konstrukcijski oblikovanu nepropusnu oplatu, ljusku koja je iznutra ojačana aluminijским potpalubnim strukturama, poput rebra, pregrada, greda. [9]

U praski, aluminijeve legure se tradicionalno zavaruju postupcima TIG-om, MIG-om te elektrolučnim plazma postupkom, no u brodograđevnom sektoru u najvećoj mjeri se kod zavarivanje aluminijevih legura primjenjuje MIG postupk. Razlog tome je što je TIG postupak sporiji i neproduktivniji, a elektrolučni postupak plazma zavarivanja iako pogodan za spajanje tankih limova ipak odlikuje većom cijenom i manjom mogućnošću raznovrsne primjene. Dok je MIG postupak u usporedbi s prethodna dva jeftiniji, produktivniji i pogodan za automatizaciju. Ovisno o vrsti plovila, većina strukturalnih komponenti (oplata, palube, pregrade) može biti zavarena MIG postupkom, pazeći pritom na prateće toplinske deformacije i metalurške probleme spomenute u prethodnom poglavlju. [12]

U proteklih nekoliko godina dolazi do raznih inovacija, poput npr. tandem sustava, visokoučinske mehanizirane metode kod koje se zavaruje s dva električna luka. Unatoč tome, potrebno je još inovativnosti kako bi se nadišlo konvencionalne postupke zavarivanja aluminijevih legura. [12]

Izuzev MIG postupka zavarivanja, pojavljuju se još dva postupka s tendencijom sve šire primjene u brodograđevnom sektoru. Oni su: [12]

- Zavarivanje laserom (ili hibridni laser-MIG proces)
- Zavarivanje trenjem

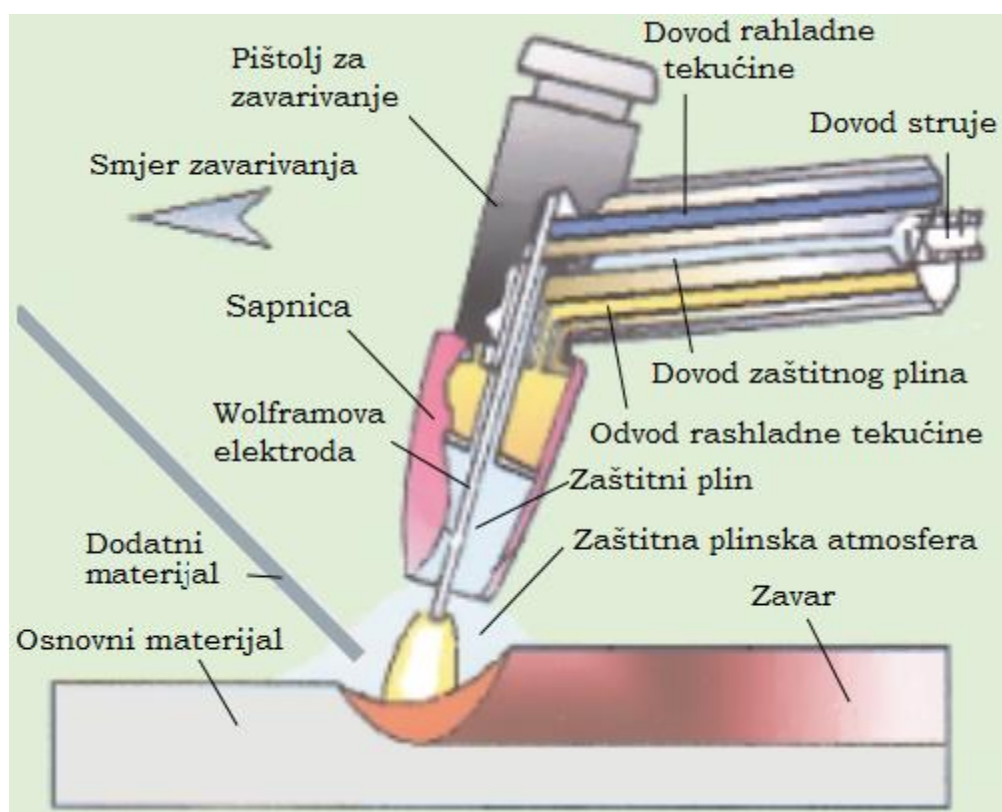
Usprkos povećanoj učestalosti primjene MIG postupka za zavarivanje aluminija u brodograđevnoj industriji, ne smijemo zanemariti mogućnost primjene drugih postupaka pogodnih za zavarivanje aluminijskih legura. Poput TIG postupka, elektrolučnog plazma postupka te zavarivanja laserom i Friction Stir postupka, koji iako možda ne nalaze toliko široku primjenu poput MIG-a, mogu isplativu i širu implementaciju pronaći u skoroj budućnosti posebice u brodogradnji brodova specijalne namjene, tzv. „custom made“ brodova te i za brodove šire primjene.

### **2.2.1. Zavarivanje TIG postupkom**

TIG (Tungsten=Wolfram Inert Gas) zavarivanje je naziv za elektrolučni postupak zavarivanja gdje se topline oslobođene u električnom luku koji se uspostavlja između elektrode načinjene od volframa i radnog komada tali osnovni, a po potrebi i dodatni materijal. Mjesto zavarivanja (rastaljeni osnovni metal, dodatni materijal, zagrijani vrh elektrode) štiti se od štetnog djelovanja okolne atmosfere inertnim plinovima. [10]

TIG u usporedbi s MIG postupkom ima manju brzinu zavarivanja, manju debljinu dodatnog metala, ograničen je na spajanje aluminijskih komponenti manje debljine (do 6 mm) te ima manju penetraciju što otežava zavarivanje korijena zavarivanja i kutnih spojeva. [3]

Osnovna oprema za TIG postupak zavarivanja sastoji se od izvora struje, pištolja za zavarivanje, izvora inertnog zaštitnog plina, dodatnog materijala te sustava za hlađenje. [3] Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja te nekih od prethodno navedenih dijelova osnovne opreme možemo vidjeti na slici 3. Za zavarivanje većine metala TIG postupak koristi izmjeničnu struju s elektrodom spojenom na negativan pol, no takve postavke ne omogućuju efikasno uklanjanje oksidnog sloja aluminijskih legura. Dok bi spajanjem na pozitivan pol istosmjernog izvora došlo do pregrijavanja i taljenja elektrode. Stoga se zavarivanje aluminijskih legura TIG postupkom odvija pri izmjeničnoj struji, kao što je opisano u poglavlju 2.1.2. [3]



**Slika 3. Shematski prikaz TIG postupka zavarivanja [8]**

Volframova elektroda kod ovog postupka služi isključivo za uspostavljanje i održavanje električnog luka. Elektrode se izrađuju od čistog volframa (danas rjeđe) ili volframa legiranog s malim dodacima (1...2%) torijevog ili cirkonijevog oksida ili nekih drugih elemenata. Ovi dodaci olakšavaju uspostavljanje luka, stabiliziraju luk, osobito pri malim strujama, smanjuju eroziju vrha elektrode te povećavaju dozvoljeno strujno opterećenje. [10]

Kod zavarivanja TIG postupkom izmjenične struje preporučuje se upotreba volframove elektrode legirane cirkonijem, jer on posjeduje veću temperaturu taljenja nego čisti volfram pa i veću nego volfram legiran torijem. Stoga takva cirkonij-volfram elektroda može podnijeti veće struje zavarivanja, otpornija je na kontaminaciju te umanjuje prskanje. [3]

Prema vrsti struje koju ćemo koristiti potrebno je prije zavarivanja nabrusiti vrh elektrode. Kako kod zavarivanja aluminijevih legura koristimo izmjeničnu struju potrebno je nabrusiti vrh u oblik polukugle te taj oblik održavati tijekom cijelog procesa zavarivanja kako bismo održali stabilan električni luk. [3]

Volframova elektroda se u radu ne smije taliti pa se naziva „netaljivom“, no uslijed erozije vrha te njegovom prijanjanju u slučaju nehotičnog kontakta s radnim komadom, što se brušenjem mora ukloniti, ona se ipak postupno troši. Trajnost elektrode duljine 170 mm prosječno je 30 sati. [10]

Za zavarivanje aluminijevih legura TIG postupkom kao zaštitni plin najčešće se koristi argon, ali moguća je upotreba i helija te mješavine argona i helija. Argonom se postiže široka, ali plitka penetracija te je iznimo lako uspostaviti stabilan električni luk. Helijem se sužuje električni luk, povećava penetracija, ali otežava uspostava i održavanje stabilnosti električnog luka. [3]

Za TIG zavarivanje primjenjuju se istosmjerni, izmjenični i kombinirani izvori struje, to jest i spravljači, motorgeneratori i transformatori. Izbor vrste izvora struje ovisi uglavnom o tome što će se zavarivati. [10]

### ***2.2.2. Zavarivanje elektrolučnim plazma postupkom***

Plazma zavarivanje se često puta uspoređuje s TIG zavarivanjem jer se iz njega razvilo. Plazmeni mlaz dobiva se tlačenjem određenog plina kroz električni luk. Električni luk se uspostavlja između wolframove elektrode koja je spojena na negativan (-) pol izvora struje i radnog komada ili sapnice pištolja samog uređaja. Osnovna prednost električnog luka kod plazma postupka je njegova paralelnost, to jest on se ne širi kao kod TIG postupka. Koncentrirani mlaz vrućih plazmenih plinova usmjeren na osnovni materijal tali ga oblikujući talinu zavarenog spoja. Plazmeni mlaz velike brzine osigurava bolji prijenos topline nego kod TIG zavarivanja istom stujom, dajući veću brzinu zavarivanja uz veću penetraciju. [10]

Moguće je zavarivanje praktički svih tehnički primjenjivih materijala, iako to nije prošireno na sve materijale. Za zavarivanje ovim postupkom izvor struje je u većini slučajeva istosmjerni sa strmo padajućom karakteristikom, ali su nam za zavarivanje aluminija i njegovih legura potrebni posebni plazma uređaji. [10]

JSC „Shipbuilding and Shiprepair Technology Center“, vodeći ruski brodograditeljski institut je razvio automatiziranu tehnologiju i uređaj za troškovno isplativo i precizno zavarivanje aluminijevih legura debljine 1,5 do 20 mm plazma postupkom.

Kao bitne prednosti zavarivanja aluminijevih legura automatiziranim elektroćnim plazma postupkom navode: [15]

- Koncentrirana aplikacija topline i automatizirana dobava žice poboljšavaju izvedbu, smanjuju deformacije pri zavarivanju te omogućuju zavarivaću bolje radne uvjete.
- Povećana je kvaliteta zavarenih spojeva zbog odličnog uklanjanja oksidnog sloja, smanjena je širina zone utjecaja topline što smanjuje potencijalnu površinu za nastanak zaostalih naprezanja i lokaliteta s reduciranom čvrstoćom te se povećava životni vijek spojeva podlegnutih izmjeničnim naprežanjima.
- Ne uzrokuje štrcanje

Postupak je moguće izvoditi i ručno i mehanizirano, praktički u svim položajima. Plazma pištolj nalikuje na TIG pištolj, ali je složeniji jer osim kanala za plazmeni plin ima često i kanal za zaštitni plin te obavezno sistem vodenog hlađenja. Kao plazmeni plin koristi se argon u kolićini od 0,5 do 2,5 l/min, a za zaštitu plazmenog mlaza i mjesta zavarivanja od okolišne atmosfere koriste se inertni plinovi, najčešće argon helij ili njihove mješavine ponekad uz male dodatke nekih aktivnih plinova. Protok zaštitnog plina kreće se od 5 do 15 l/min. [10]

Kao razlog ne toliko široke primjene u brodogradnji iako pogodan za spajanje tankih limova elektroćni postupak plazma zavarivanja ipak odlikuje većom cijenom i manjom mogućnošću raznovrsne primjene u usporedbi s, široko primjenjivim, MIG postupkom.

### **2.2.3. Zavarivanje laserom**

Laserska zraka proizvodi se u laserskom mediju, a postoje dva osnovna tipa za primjenu u obradi metala: [10]

- Laseri s krutim medijem (Nd:YAG laser)
- Plinski laseri (CO<sub>2</sub> laser)

Kod CO<sub>2</sub> lasera fokusiranjem i reflektiranjem možemo dobit zraku lasera „točkastog oblika“ velićine 0,4 do 0,6 mm. Stoga zavar napravljen laserom ima dimenziju 20% usporedno s dimenzijom zavara napravljenog MIG postupkom. Samim time reducirana je i širina zone utjecaja topline na otprilike 10% širine zone utjecaja topline dobivene MIG postupkom, ali je pad mehanićkih svojstava na tom presjeku neizbježan. [12]

Postupak zavarivanja laserom odvija se, u pravilu, bez dodatnog materijala. Iako je u određenim okolnosti upotreba dodatnog materijala preporučena kako bi popravio kemijski sastav taline ili uslijed velikih razmaka između komponenata kako bi se izbjegle šupljine.

Industrijska upotreba zavarivanja laserom u brodograđevnom sektoru započela je 1990.-tih, ali značajna praktična upotreba je tek nedavna. Primjena tehnologije zavarivanja laserom, uz sve prednosti, zahtjeva ispunjenje strogih uvjeta: [12]

- Kontinuiran te vrlo malen razmak između komponenti (0,1 - 0,2 mm)
- Ravnost površina rubova na spoju komponenata
- Točno i čvrsto stezanje komponenata

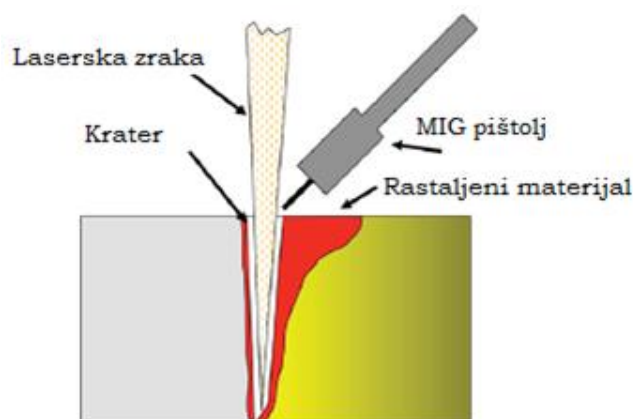
Čest problem tehnologije izrade broda, kako aluminijskih tako i čeličnih, je zavarivanje sučeljenog spoja limova npr. debljine 3 do 8 mm te duljine do 18 m. Kao najuspješnije rješenje tog problema kod aluminijevih legura pokazao se hibridni postupak laserskog zavarivanja i MIG postupka, poznatiji i kao hibridni laserski postupak. [12]

#### 2.2.3.1. Hibridno lasersko zavarivanje

Njemačko Meyer Werft brodogradilište je u suradnji sa sveučilištem u Aachenu i istraživačima s Njemačkog instituta za zavarivanje i spajanje nastojalo razviti način za implementaciju postupka hibridnog laserskog zavarivanja u brodogradnji. Rezultat je bio otvaranje nove panel linije 2000.-te godine za zavarivanje paluba i potpalubnih pregrada hibridnim laserskim postupkom s CO<sub>2</sub> laserima. Što je za posljedicu imalo prihvatanje tehnologije te zahtijevalo razvoj novih specifikacija za brodogradnju od strane organizacija poput DNV-a i Lloyd-a. [13]

Hibridno lasersko zavarivanje aluminijevih legura je tehnološko rješenje kod kojeg laserska zraka tehnikom protaljivanja proizvodi krater u koji se dovodi odgovarajući dodatni materijal u obliku žice pomoću MIG postupka (slika 4.).

Jedna od prednosti ovog postupka u odnosu na klasičan postupak zavarivanja laserom je mogućnost zavarivanja komponenti s većim pripremljenim razmakom. [12]



**Slika 4. Shematski prikaz hibridnog laserskog zavarivanja [13]**

Kao što zavarivanje laserom tolerira razmake od 0,1 do 0,2 mm, hibridno lasersko zavarivanje tolerira razmake od 0,8 do 1,0 mm te može zavarivati limove debljine 5 do 10 mm debljine brzinama od 1 m/min do 2,5 m/min. [12]

Svrha MIG postupka kod hibridnog laserskog zavarivanja je: [13]

- Dodavanje dodatnog materijala pri povišenoj temperaturi
- Dopušta ostvarivanje spojeva komponenti s većim pripremnom razmakom
- Ponekad mijenja kemijski sastav zavara

Najveća prepreka ka većoj primjeni postupka hibridnog laserskog zavarivanja je, iako on dopušta veće razmake između komponenti te manje stroge zahtjeve pripreme od klasičnog laserskog postupka, problem što s porastom debljine lima dolazi do ograničenja njegove upotrebe. Smatra se da je uz upotrebu odgovarajućeg lasera moguća primjena na komponentama debljine 12 do 15 mm. [13]

#### **2.2.4. Friction Stir postupak zavarivanja**

Zavarivanje trenjem je postupak izumljen 1991. na The Welding Institute of United Kingdom. Smatra se posebice pogodnim za zavarivanje sučeljenih i preklopnih spojeva aluminijevih legura. Postupak se odvija bez dodatnog materijala, bez zaštitnog plina te omogućuje zavarivanje s potpunom penetracijom aluminijske debljine od 0,5 mm pa sve do 75 mm u jednom prolazu. Različite aluminijske legure pa i gnječene i lijevane mogu se jednostavno spojiti Friction Stir postupkom. [14]

Sam postupak se odvija pri mnogo nižim temperaturama u usporedbi s konvencionalnim elektrolučnim postupcima stoga su zaostala naprezanja i deformacije tipično vrlo niske. Uz to, ovaj postupak proizvodi iznimno finu sitnozrnatu strukturu na području spoja.

U potpunosti je mehaniziran, jer generirane sile ne bi bilo moguće kontrolirati na drugi način, kao iznimka se mogu uzeti komponente malih debljina. Oprema za zavarivanje trenjem je skuplja u odnosu na opremu za elektrolučne postupkom, ali trošak rada je niži kod postupka zavarivanja trenjem te kvaliteta zavara ima veću ujednačenost. Optimalnu primjenu u brodogradnji postupak pronalazi pri sučeljenom spajanju ekstrudiranih komponenti orebrenih panela. Kako su deformacije pri zavarivanju trenjem male orebreni paneli se izrađuju u obliku sklopa koji se naknadno reže na odgovarajuće dimenzije. [14]

U tablici 7. vidimo primjer minimalne zahtjevane čvrstoće, žilavosti i istežljivosti aluminijevih legura EN AW 5456–H116 i 6061–T6 za osnovni materijal i materijal zavara dobiven MIG postupkom te iste podatke ispitane za zavareni spoj dobiven trenjem. [14]

**Tablica 7. Zahtjevi mehaničkih svojstava osnovnog materijala i metala zavara dobivenog MIG postupkom te tipične vrijednosti mehaničkih svojstava trenjem dobivenog zavarenog spoja [14]**

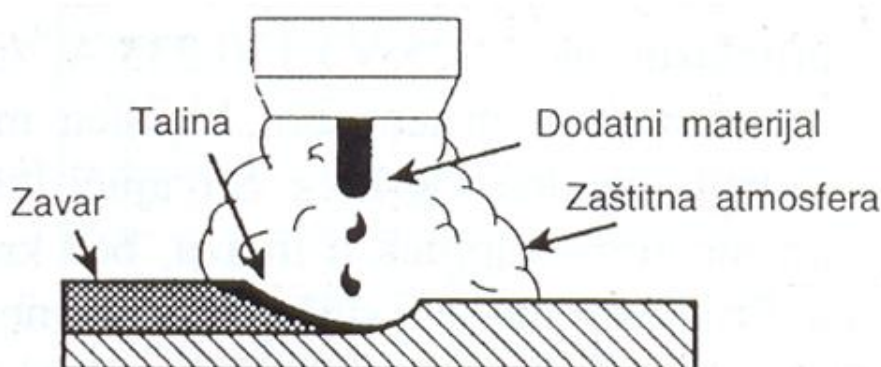
Legura	Postupak spajanja	Vlačna čvrstoća [MPa]	Žilavost [MPa]	Istežljivost [%]
5456-H116	Osnovni metal	330, min	230, min	12, min
5456-H116	MIG	290, min	180, min	nema potrebe
5456-H116	Friction Stir	370	176	nije izviješteno
6061-T6	Osnovni metal	290, min	241, min	10, min
6061-T6	MIG	165, min	140, min	nema potrebe
6061-T6	Friction Stir	250	161	7,2

Prednosti postupka su: kratko vrijeme zavarivanja, nepotreban je dodatni materijal, visoka i ujednačena kvaliteta spojeva, jednostavno upravljanje parametrima zavarivanja, mogućnost spajanja raznorodnih materijala pri čemu se štedi na skupljem (npr. spajanje obični čelik – brzorezni čelik kod alata), značajne uštede u strojnoj obradi. [10]



### 2.3. MIG zavarivanje aluminijevih legura

MIG (Metal Inert Gas) je postupak kod kojeg se električni luk održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice, u pravilu spojene na pozitivan pol istosmjernog izvora struje. Proces se odvija u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju inertni plinovi (Ar ili He). Zaštitni plinovi koji se koriste kod ovog postupka štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere, a dovode se na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju (slika 5.). U slučaju primjene inertnog plina (Ar, He ili njihove mješavine) nema reakcije rastaljenog metala s plinom pa se takvi koriste za zavarivanje osjetljivijih materijala na utjecaj plinova iz atmosfere, poput aluminijevih legura (Cu i njegove legure, CrNi čelici, Ti i slično). [10]

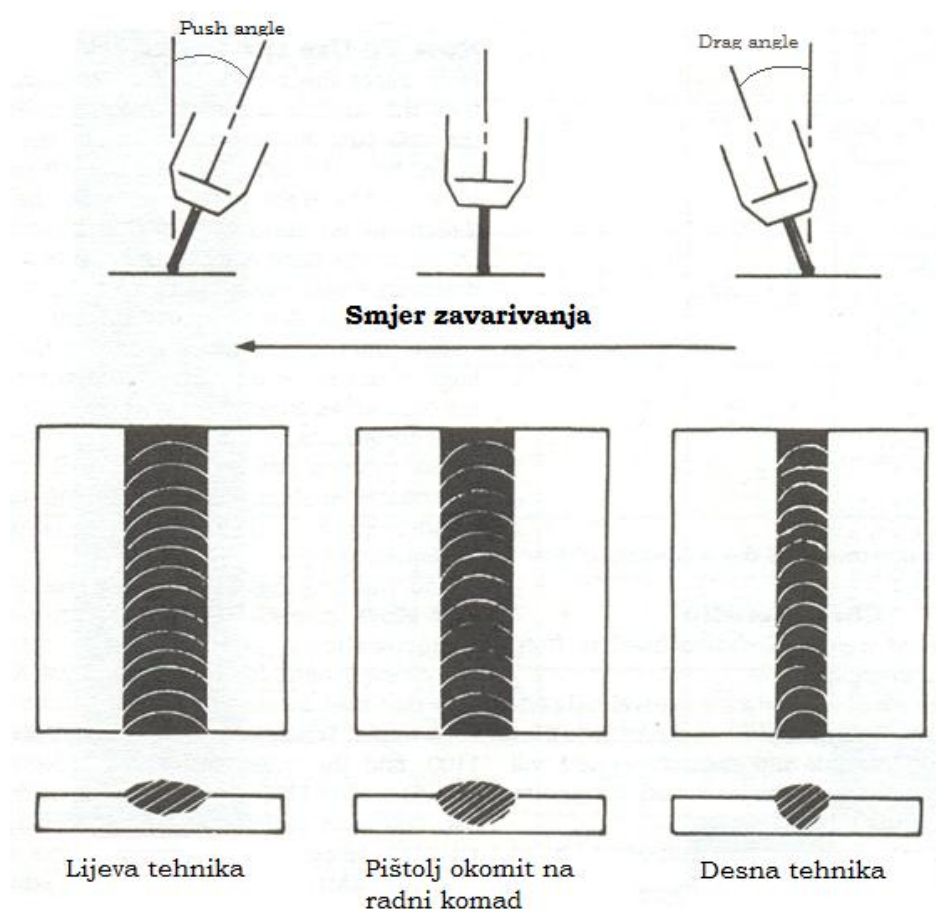


**Slika 5. Shema elektrodučnog zavarivanja taljivom metalnom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova [16]**

Postoje dvije tehnike rada, lijeva tehnika i desna tehnika (slika 6.). Lijeva tehnika (prvo napreduje dodatni materijal, a za njim slijedi plamen) primjenjuje se za zavarivanje tanjih limova (tanjih od 3 mm), a kod debljih limova obavezna desna tehnika. [10]

Pri zavarivanju aluminijevih legura potrebno je održavati „push angle“ od 5° do 10°. Zavarivanjem održavajući pištolj pod „drag angle“, odnosno desnom tehnikom, može doći do odsutnosti zaštitnog plina kod taline što će rezultirati površinski crnim ili sivim zavarom. [17]

Po završetku zavarivanja moguća je pojava onečišćenja na površini ili rubovima zavara, ta je pojava očekivana, a razlog je otapanje oksida aluminija i magnezija. Posebice je očekivana pri upotrebi dodatnog materijala iz serije 5xxx, jer ta serija sadrži dovoljno velik udio magnezija koji pogoduje stvaranju tih onečišćenja. Pojava onečišćenja može ukazivati na potrebu za podešavanjem tehnike zavarivanja. [17]



**Slika 6. Posljedica pozicije elektrode i tehnike zavarivanja na širinu i penetraciju zvara [16]**

Prednosti MIG postupka zavarivanja su: [16]

- Primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala
- Velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala
- Zavarivanje u svim položajima
- Zavarivanje u radionici i na terenu
- Mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- Mogućnost primjene praškom punjene žice
- Široki raspon debljina
- Velika učinkovitost i proizvodnost
- Pogodan za automatizaciju
- Moguća primjena i za lemljenje

Dok su nedostaci sljedeći: [16]

- Kod rada na terenu moguće greške zbog loše zaštite-vjetar!
- Problemi kod dovođenja žice (posebno aluminij)
- Veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost)
- Štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potreba za naknadnom obradom)
- Složeniji uređaji (dovođenje žice, automatska regulacija)

### **2.3.1. Prijenos metala pri MIG zavarivanju**

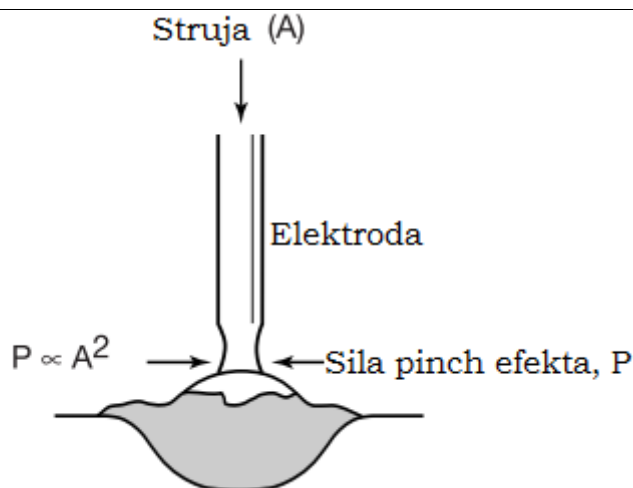
Pri zavarivanju aluminijevih legura bitno je ponovno spomenuti da je njihova toplinska vodljivost otprilike pet puta veća nego ona ugljičnih čelika, stoga načini prijenosa metala s nižim unosom energije nisu pogodni za postizanje dobre difuzije. [17]

Načini prijenosa metala pri MIG zavarivanju su: [16]

- Kratkim spojevima
- Prijelaznim lukom
- Štrcajućim lukom
- Impulsno zavarivanje

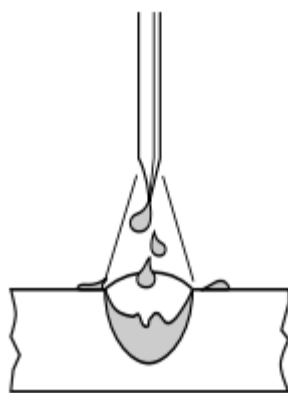
Kod prijenosa metala kratkim spojevima (slika 7.) koriste se male struje zavarivanja (od 50 do 170 A), niski naponi (od 13 do 21 V) i elektrodne žice malih promjera (od 0.6 do 1.1 mm). Pogodan je za spajanje tankih materijala (od 0,6 do 5 mm) zbog male količine rastaljenog metala, malenog unosa topline, malih deformacija za korijenske prolaze te u prisilnim položajima. [18]

Način prijenosa kratkim spojevima zbog toga što ima nisku unošenu energiju nije preporučen za zavarivanje aluminijevih legura. [17]



**Slika 7. Shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojevima [18]**

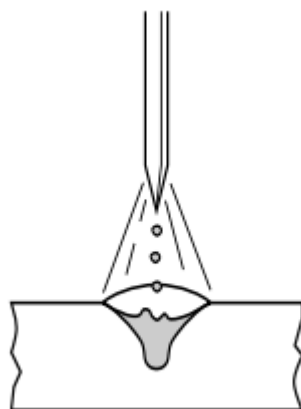
Prijenos metala prijelaznim lukom (slika 8.) je kombinacija štrcajućeg luka i u manjoj mjeri kratkih spojeva. Koriste se struje (od 170 do 235 A) i naponi (od 22 do 25 V) veće su nego je slučaj kod prijenosa kratkim spojevima, što uzrokuje stvaranje većih kapljica koje se nepravilno odvajaju i padaju s vrha elektrode što ima za posljedicu pojava prskanja, nemogućnost zavarivanja u svim položajima i lošiji izgled zavara. [18]



**Slika 8. Shematski prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom [18]**

Kod prijenosa metala štrcajućim lukom (slika 9.) karakteristično je da se metal s vrha elektrode slobodnim letom sitih kapljica prenosi kroz atmosferu luka i pritom elektroda ne dolazi u kontakt s osnovnim materijalom. Pogodan za zavarivanje većih debljina zbog jačih struja (od 200 do 600 A) i viših napona (od 25 do 40 V), mogućnost zavarivanja u položenom i horizontalnom položaju uz velike brzine depozicije materijala, malog prskanja, omogućuje veliku penetraciju i lijep izgled zavara. [18]

Neki od nedostataka i ograničenja štrcajućeg luk su: upotreba isključivo u položenom i horizontalnom položaju, generiranje zavarivačkih para je povećano, povećano zračenje toplote i svjetlosti zahtjeva veću zaštitu zavarivača i okoline, kod rada na terenu potrebna zaštita od okolišnih uvjeta, cijena mješavine plinova za osiguranje zavarivanja štrcajućim lukom je veća od cijena 100% CO<sub>2</sub>. [18]



**Slika 9. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [18]**

Kod prijenosa metala impulsnim zavarivanjem izvor daje impulsnu struju frekvencije od 20 do 300 Hz. Osnovni parametri kod ovog načina prijenosa metala su: vršna impulsna struja koja se kreće u rasponu od 250 do 650 A, osnovna struja (od 20 do 50 A), perioda impulsa (od 1 – 3 ms), frekvencija (od 20 do 300 Hz), brzina žice (od 2 do 15 m/min) koju obično postavlja zavarivač, a ostale parametre podesi programska jedinica stroja. Velika odlika ovog načina prijenosa metala je mogućnost reguliranja veličine kapi u zavisnosti od frekvencije gdje se za svaki impuls odvajaju jedna kapljica, stabilan i miran električni luk. [18]

Štrcajući luk i impulsno zavarivanje su preferirani načini prijenosa metala. Oba sposobna osigurati dovoljan unos energije za omogućavanje dobre difuzije. [17]

### 2.3.2. *Zaštitni plinovi*

Mjesto zavarivanja, kapljice rastaljenog metala za vrijeme leta kroz električni luk i talina se moraju zaštititi od djelovanja okolne atmosfere, a ta je zaštita moguća pomoću odgovarajućih plinova. Utjecaj zaštitnih plinova odražava se na: [10]

- električno-fizikalna svojstva električnog luka i time na prijenos metala s elektrode na radni komad
- metalurške procese u talini zavara
- tehnološke procese

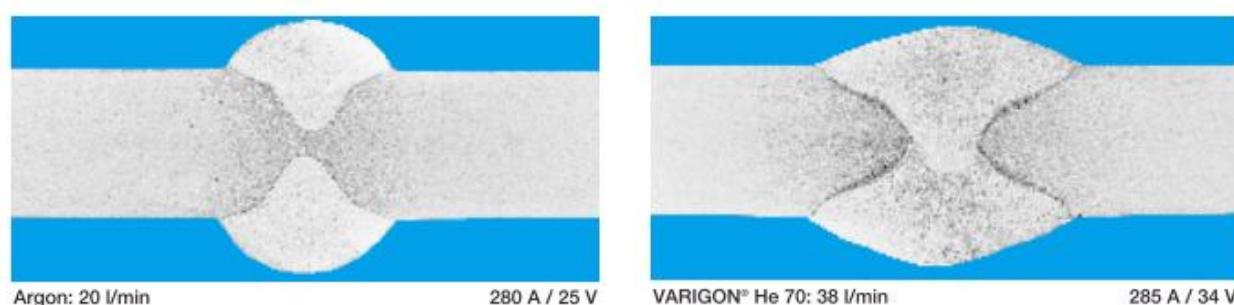
Jedini zaštitni plinovi za zavarivanje aluminijevih legura su argon ili mješavine argona i helija. Komponente zaštitnih plinova poput kisika, vodika ili ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ) se ne bi trebala koristiti za MIG zavarivanje aluminijevih legura. Čak i u tragovima ove komponente imaju negativan utjecaj na kvalitetu zavara. [17]

Preporučeni zaštitni plin za zavarivanje aluminijevih legura debljine do 12,7 mm debljine je 100% argon. Kod zavarivanja komponenta debljina većih od prethodno navedene, gdje se zahtjeva veći unos energije za taljenje materijala, najčešće se koriste mješavine 75% argona/25% helija ili 75% helija/25% argona. [17]

Usporedbom argona i helija možemo uočiti da je argon, koji je najgušći od inertnih plinova, 10 puta gušći od helija. Upravo zbog toga je pri upotrebi helija potreban veći protok za istu kvalitetu zaštite u položenom položaju. Toplinska vodljivost plinske atmosfere i pojave u njoj utječu na radijalne gubitke topline što utječe na oblik jezgre i njegovu geometriju. [10]

Toplinska vodljivost je jedno od najvažnijih svojstava za izbor zaštitnog plina. Visoka toplinska vodljivost omogućuje veću provodljivost topline u radni komad. Isto tako određuje oblik električnog luka i veličinu zone utjecaja topline. Argon ima nižu toplinsku vodljivost od helija, tek 10% toplinske vodljivosti helija. [18]

Stoga, argon daje usku zonu jezgre luka, dok helij pruža širu zonu jezgre luka, ali manju penetraciju (lećasta penetracija), kako je vidljivo na slici 10. [10]



**Slika 10. Usporedba utjecaja argona i helija na penetraciju i širinu zavora [19]**

Na slici 10. možemo vidjeti i potrebu za većim protokom kod mješavine VARIGON He te veći napon pri istoj jakosti struje u usporedbi sa zaštitom argonom. Pritom je bitno napomenuti da je VARIGON He mješavina helija i argon, sastav 70% He i 30% Ar. [19]

Nadalje, argon ima nižu cijenu od helija, stvara stabilniji električni luk, ali uslijed niže toplinske vodljivosti ima i nizak unos topline te shodno tome i niže brzine zavarivanja.

Helij povećava napon električnog luka do 20% u usporedbi s argonom, što uzrokuje povećan unos topline, ali uz višu cijenu, pri upotrebi helija se javlja problem s postizanjem i održavanjem stabilnog električnog luka. [3]

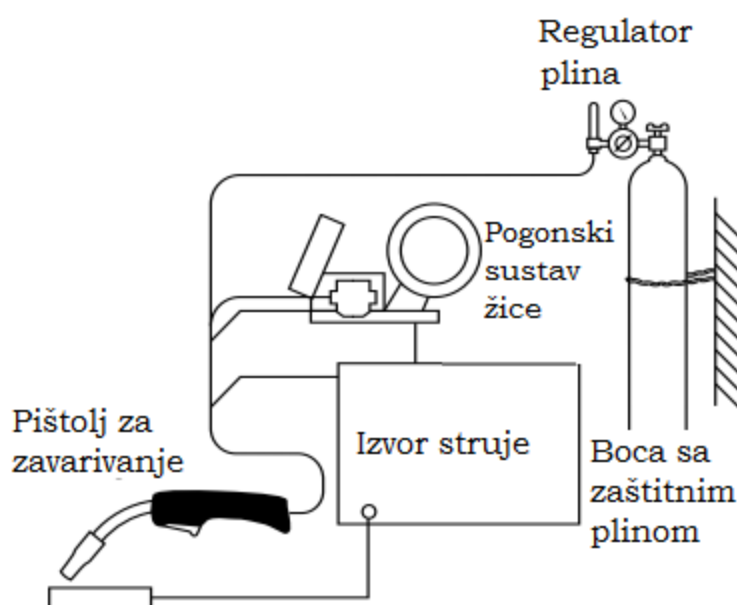
Čisti se helij kao zaštitni plin koristi pri mehaniziranom ili automatiziranom zavarivanju aluminijskih legura. Za ručno zavarivanje koriste se mješavine argona i helija koje omogućuju postizanje karakteristika oba plina. [3]

Sigurna dobava zaštitnog plina je bitan čimbenik u kvaliteti zavora. Stoga se na izlazu iz boce (spremnika) za zaštitni plin postavlja regulator plina s pokazivače protoka, koji zavarivaču pokazuje koliki je tlak u boci te time i prostalu količinu plina i pokazuje protok zaštitnog plina koji izlazi iz boce. [18]

### 2.3.3. Oprema i izvori struje za MIG zavarivanje

Osnovni industrijski MIG/MAG sustav se sastoji od četiri komponente: [18]

- izvor struje
- pogonski sustav žice
- pištolj za zavarivanje i polikabel
- boca sa zaštitnim plinom i regulator plina



Slika 11. Prikaz osnovne opreme za MIG zavarivanje [18]

#### 2.3.3.1. Izvori struje

Razvoj izvora struje za MIG zavarivanje aluminijevih leguraja povezan s razvojem izvora sa statičkim karakteristikama strmopadajuće – konstantne jakosti struje (eng. Constant Current – CC) i ravnog – konstantnog napona struje (eng. Constant Voltage – CV). Prije razvoja izvora s CV statičkom karakteristikom zavarivanje aluminijevih legura je bilo ograničeno na izvore s CC statičkom karakteristikom. Razvijene su specijalne tehnike uspostave električnog luka te posebni pogonski sustavi žice kako bi se omogućila lakša uspostava nestabilnog električnog luka povezanog s izvorima CC statičke karakteristike. Razvoj izvora s CV statičkom karakteristikom ih je u početku činio nezadovoljavajućim zbog problema s penetracijom te pratećim greškama uzrokovanim nepotpunom difuzijom. [17]

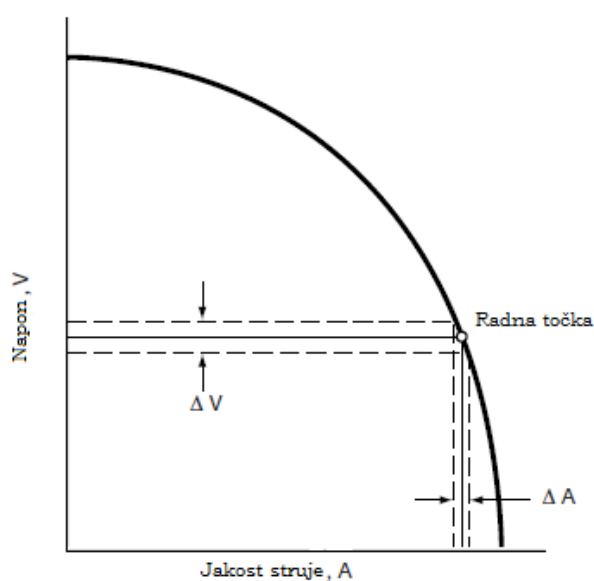


Daljnji razvoj CV izvora omogućio je konzistentniju izlaznu karakteristiku. CV izvori danas nalaze široku primjenu te se preporučuju za MIG postupak zavarivanja aluminijskih legura. [17]

Statička karakteristika strmopadajuće-konstantne jakosti struje (CC) znači da je ponašanje izvora struje konstruirano da održava vrijednost jakosti struje približno istu dok se vrijednost napona struje mijenja sa visinom električnog luka. Dok izvor statičke karakteristike ravnog-konstantnog napona struje (CV) održava napon struje konstantnim dok se jačina struje mijenja visinom električnog luka. [20]

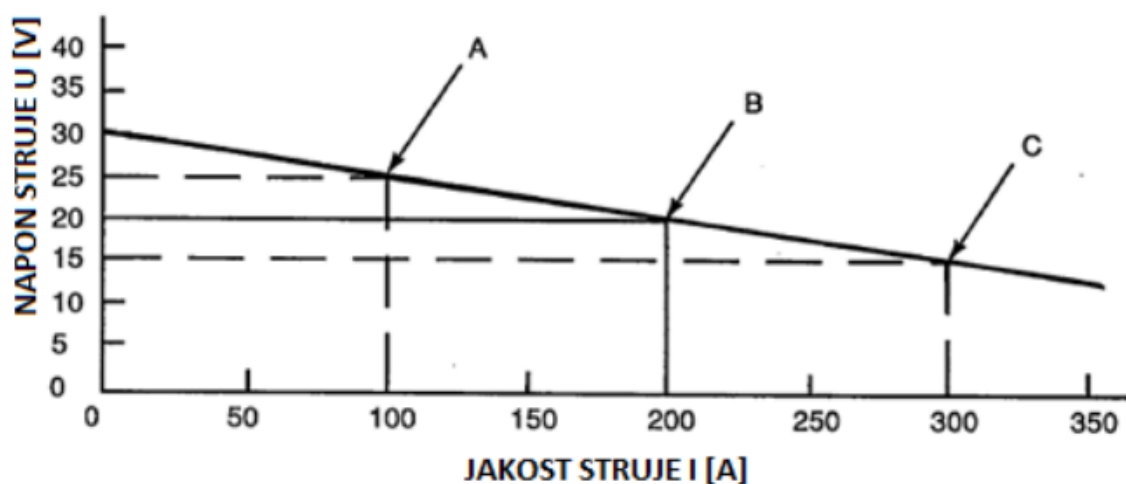
Na slikama 12. i 13. vidimo usporedbu strmopadajuće i ravne izlazne karakteristike. Strmopadajuće karakteristike su prikladne za izvore struje koji se koriste za ručne postupke, a razlog tome je brzina kompenzacije promjene visine električnog luka, tj. koliko brzo izvor struje može odgovoriti na promjene u vođenju električnog luka. Ovakva vrsta karakteristike ima obilježja da zbog konstantne jakosti struje imamo približno konstantnu brzinu stvaranja kapljica koje će postati depozit, a zbog varijacije visine napona se geometrija luka može rapidno promijeniti. [20]

Kako bi se kompenzirao taj problem pri vođenju električnog luka konstruirani su posebni pogonski sustavi žice koji sa smanjenjem visine električnog luka povećavaju brzinu dobave žice i obrnuto. Izvori CC statičke karakteristike osiguravaju jednoliku penetraciju, a kao primarni nedostaci se navode uspostava električnog luka i mogućnost regulacije duljine električnog luka. [18]



Slika 12. Dijagram struje i napona prikazuje strmopadajuću izlaznu karakteristiku, CC–constant voltage [18]

Upotreba ravne karakteristike se isključivo povezuje sa automatskim postupcima. Kod CV karakteristike se teži održati visinu električnog luka konstantnom, ali bilo kakva promjena visine povlači sa sobom drastičniju promjenu jakosti struje što ujedno znači i veliku promjenu količine depozita na radni komad. [20]



Slika 13. Dijagram struje i napona prikazuje ravnu izlaznu karakteristiku, CV–constant voltage [20]

Električni luk se može održavati bilo izmjeničnom, bilo istosmjernom strujom pa se prema tome izvori dijele na izvore izmjenične i istosmjerne struje. Izvori istosmjerne struje su: [10]

- generatori istosmjerne struje
- ispravljači

Izvori izmjenične struje su: [10]

- transformatori
- pretvarači frekvencije

Klasični MIG uređaji su ispravljači najčešće sa izlaznom karakteristikom konstantnog napona (eng. Constant Voltage - CV) te razina napona nije direktno proporcionalna razini jakosti struje. [20]

Ispravljanje se vrši pomoću ispravljačkih elemenata, koji propuštaju struju samo u jednom smjeru, dok za drugi smjer predstavljaju vrlo velik otpor. Najpovoljniji su trofazni izvori s punovalnim ispravljanjem jer daju gotovo konstantnu istosmjernu struju s jednolikim opterećenjem mreže. Regulacija struje zavarivanja u izlaznom krugu moguće je izvesti na više načina kao na primjer: [10]

- pomoću pomične kotve
- izmjenom broja zavoja na transformatorskom dijelu
- pomicanjem namotaja na jezgri
- tiristorski
- tranzistorski

Za impulsno zavarivanje MIG postupkom koriste se tranzistorski izvori struje, koji omogućuju pravilan izbor stabilnih parametara bez međusobne zavisnosti te se koriste posebni izvori sa sinergijskom kontrolom, odnosno sustav sinhronizirane energetske kontrole. [10]

Taj se sustav zasniva na kontroli pomoću jednog parametra pri čemu se ostali automatski odabiru. Mogu se postići takvi parametri da se za vrijeme svakog impulsa prenese jedna kapljica metala sa žice na radni komad. [10]

### 2.3.3.2. Pogonski sustav žice

Pogonski sustav žice ili dodavač žice služi za automatsko dodavanje žice (elektrode) u MIG/MAG i EPP procesima zavarivanja. Glavni parametri na koje možemo posredno utjecati putem dodavača žice su slobodni kraj žice i brzina dodavanja žice. Pogonski sustav se može nalaziti unutar kućišta izvora struje za zavarivanje čime se želi dobiti manji volumen uređaja, veća mobilnost i ušteda cijene proizvodnje. Danas se dodavači žice većinom montiraju van kućišta kao zasebna jedinica zbog prednosti poput, rotacije modula s obzirom na izvor struje za zavarivanje, što je vrlo korisno kod većih radnih komada kojima je pristup otežan. Bolja preglednost namotaja žice na kolutu u slučaju pogreške pri uvođenju. [20]

Kod MIG zavarivanja aluminijskih legura javlja se problem efikasnog dovodenja dodatnog materijala, žice odnosno elektrode kroz pogonski sustav, polikabel te kroz pištolj za zavarivanje do željenog radnog lokaliteta. Uzrok problema je manja krutost aluminijskih u odnosu na čelične legure. Stoga se koriste posebni pogonski sustavi i pištolji kako bi se olakšalo dovodenje dodatnog materijala, pogonski sustavi koji se koriste za dobavu žica aluminijskih legura su: [17]

- Push sustav
- Push-Pull sustav

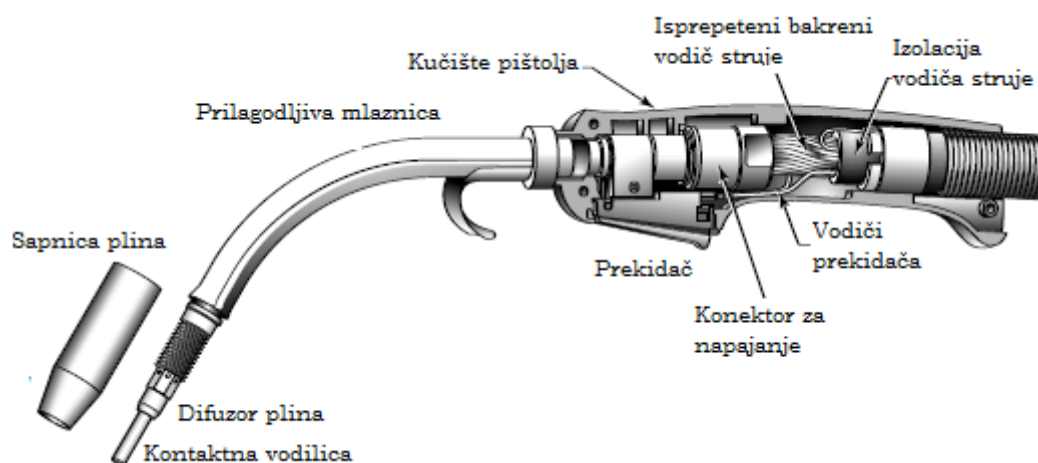
Push sustav gura žicu kroz poli kabel kotačićem u uređaju za dodavanje žice. Bitno je naglasiti da je utor kotačića U profila kako ne bi došlo do oštećenja žice prilikom vođenja. Kod žica od aluminijskih legura zbog manje krutosti postoji velika vjerojatnost da će žica zaglaviti u poli kablu, što dovodi do nepravilne brzine dodavanja žice. Takvi dodavači žice ograničeni su na minimalnu debljinu žice od 1,6 mm i duljine polikabla od 3 do 3,6 m. [17]

Push-Pull sustav, kako mu i naziv govori, je kombinacija push sustav i pull sustava. Takav sustav odgovara na izazove vođenja žica aluminijevih legura manje krutosti, malih promjera (0,8-1,6 mm) te duljine poli kabela do 15,2 m. Ovakav sustav pruža najkonzistentniju izvedbu u usporedbi s ostalim sustavima. [17]

### 2.3.3.3. Pištolj za zavarivanje

Pištolj za MIG zavarivanje (slika 14.) je polikabelom povezan s pogonskim sustavom žice. Polikabel služi kao vod za električnu struju, zaštitni plin i dodatni materijal. Unutarnja građa polikabela ovisi o konfiguraciji izvora struje za zavarivanje, tj. koristimo li izvor struje s vodenim hlađenje ili obično zračno hlađenje pištolja za zavarivanje. Sitnija vlakna, fino namotana daju veću fleksibilnost polikabela. Pored dovoda i odvoda vode za hlađenje, u kabelu je sadržan dovod za žicu, dovod za plin te strujni pinovi za provod signala za paljenje i gašenje luka, te novih funkcija poput zaslona i kontrola na modernim pištoljima za zavarivanje. [20]

Pritiskom prekidača električna struja dovedena polikabelom preko bakrenog vodiča struje prijenosi se u kontaktnoj vodilici na žicu dodatnog materijala uz istovremen izlazak zaštitnog plina iz sapnice. [18]



Slika 14. Poprečni presjek pištolja za zavarivanje [18]

Za MIG zavarivanje aluminijevih legura razvijeni su i posebni pištolji, poput push-pull pištolja i spool pištolja.

#### 2.3.4. Impulsno MIG zavarivanje

Impulsno MIG/MAG zavarivanje počelo se razvijati krajem šezdesetih godina prošlog stoljeća. Zavarivanje impulsnim MIG postupkom osigurava prijenos metala je slobodnim letom kapljice bez kratkih spojeva, odnosno izvor struje generira promjenjiv oblik struje (impulsa), koji omogućava otkidanje samo jedne kapljice tijekom impulsa. [21]

Takav se prijenos metala može realizirati i kod struja zavarivanja manjih od kritičnih, tj. u području struja kod kojih je pri klasičnom MIG zavarivanju prijenos metala kratkim spojevima, a razlog tome je što vrijednost maksimalne struje impulsa  $I_p$  takva da se zbog elektromagnetskih sila na vrhu žice kapljica otkida i biva izbačena prema talini u svim položajima zavarivanja. [10]

Glava obilježja impulsnog postupka su: [20]

- Jakost struje: 80 - 500 A, napon struje: 13 - 30 V
- Promjeri žica: 0,8 mm do 2,4 mm
- Kontroliran unos topline
- Preporučeno korištenje inertnog zaštitnog plina (argon)
- Konstantna visina električnog luka uz minimalno štrcanje
- Mlaz sitnih kapljica koje kontinuirano i ujednačeno padaju na radni komad
- Prikladan za robotizaciju i mehanizaciju
- Prikladan za sve položaje zavarivanja (ovisno o parametrima)
- Izrada popunskih i završnih prolaza
- Spajanje radnih komada debljina: 1,0 mm i više

Prije su korišteni tiristorski izvori struje za MIG impulsno zavarivanje kod kojih je zbog sinusoidnog oblika impulsa pravilan izbor stabilnih parametara bio otežan. [10]

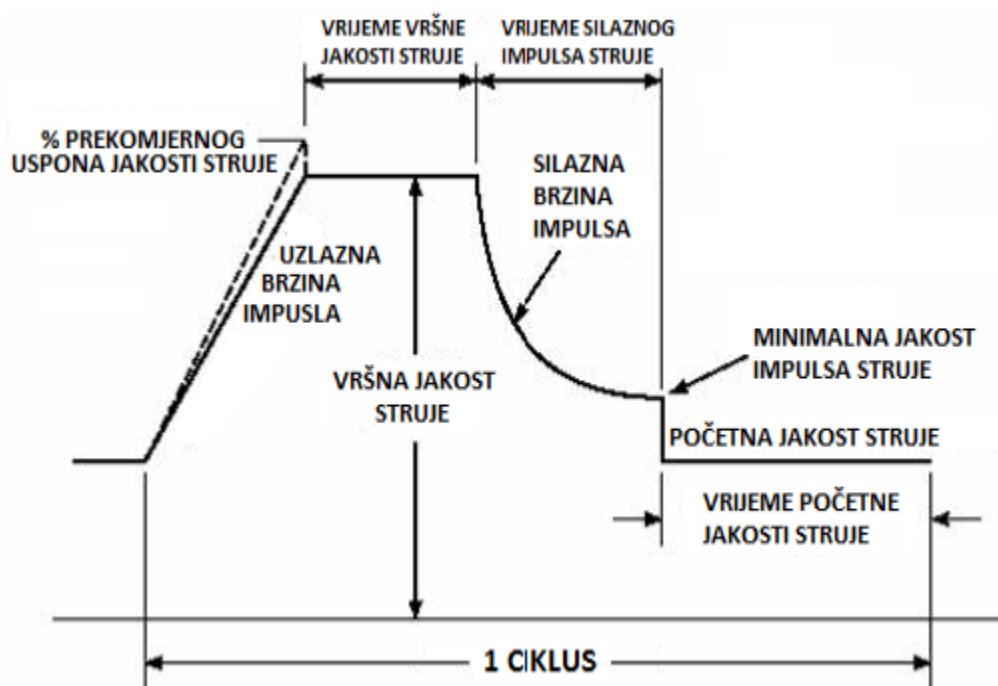
Daljnje mogućnosti razvoja postupka omogućili su digitalno upravljani tranzistorski izvori, kojima je moguće stvarati strujne impulse proizvoljnog oblika. Kod njih je moguć izbor bilo koje frekvencije te visine i širine impulsa i osnovne struje bez međusobne zavisnosti. [10]

Nakon razvoja tranzistorskih uređaja, a radi što jednostavnije regulacije parametara zavarivanja razvijeni su tzv. „one knob“, odnosno sinergijski sustavi gdje se na osnovi najčešće jednog parametra automatski određuju ostali. [10]

Sinergijski izvori struje za zavarivanje dolaze sa preprogramiranim modelima prijenosa metala gdje je pojedini način prijenosa tvornički ispitan kako bi izvor dao što optimalniju kombinaciju jakosti struja i uzlazno silaznih karakteristika. [20]

Impulsno MIG zavarivanje koristi nisku pozadinsku ili početnu struju (background current), dovoljno nisku za održavanje električnog luka, ali ne toliko da bi se žica dodatnog materijala rastalila i odvojila. [3]

Na početnu struju dolazi do pojava impulsa, odnosno uzlaznom brzinom impulsa se postiže vršna struja koja je značajno viša od potrebne da se ostvari štrcajući električni luk. Tim se iskoriste pozitivne strane štrcajućeg luka poput načina prijenosa metala sitnim kapljicama, ali uz manje struje zbog kontrole impulsa kojim se kapljica odvaja od žice. [20]



Slika 15. Prikaz faza u prijenosu metala pri impulsnom zavarivanju [20]

Osnovne prednosti postupka su: [21]

- proces se može potpuno kontrolirati u smislu stabilnosti parametara i unošenja energije
- zavarivanje bez rasprskavanja prenijeto je i u nisko područje parametara zavarivanja, što znači da se uspješno mogu zavarivati tanji limovi, ili zavarivati u prisilnim položajima debljim žicama, s boljim rezultatima nego kratkim lukom
- zavarivanje impulsnim lukom unutar područja štrcajućeg luka omogućava bolju penetraciju u materijal
- oblik zavara je konstantan (nadvišenje, širina, oblik)
- precizno odvajanje kapljice onemogućuje njihovo pregrijavanje čime se smanjuje i emisija dimova

Postupak ima i svoje nedostatke kao npr.: [21]

- skuplji uređaji za zavarivanje
- općenito manja produktivnost u području velikih parametara u odnosu na štrcajući luk

Izuzev konvencionalnog i impulsnog MIG postupka, zavarivanje aluminijskih legura može se izvesti i nekim o modificiranih postupaka MIG zavarivanja. Poput CMT (eng. Cold Metal Transfer) koji predstavlja modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima pri čemu se primjenjuje „mehaničko“ rješenje tj. povratno gibanje žice, STT (eng. Surface Tension Transfer) koji za regulaciju odvajanja kapljice koristi mehanizam površinske napetosti, nadalje, AC-MIG koji omogućuje bolju kontrolu procesa i premošćivanje većih zazora kod tanjih materijala i razni drugi.

### **2.3.5. Automatizirano i robotizirano MIG zavarivanje**

Automatizacija klasičnog MIG postupka je vrlo jednostavna. Pištolj za zavarivanje se iz zavarivačeve ruke postavlja u manipulator koji omogućuje pri istim jakostima struje veće brzine zavarivanja. Uvođenjem automatizacije se ostvaruje povećanje produktivnosti procesa i druge prednosti, ali to zahtjeva veću izdržljivost i konzistentnost izvora struje, dodavača žice i pištolja za zavarivanje. [3]



Naime, kod automatiziranog i robotiziranog zavarivanja, iako se parametri točnije odražavaju nego ako zavarivanje izvodi čovjek, granice upravljanja su ipak uže, tj. čovjek može uspješnije kompenzirati netočnosti i nepredviđene poremećaje. [10]

Kako je već spomenuto, kod automatiziranih i robotiziranih izvedbi zahtjeva se veća izdržljivost i konzistentnost izvora struje, dodavača žice i pištolja za zavarivanje.

Primjeni kod oba su sustava, automatiziranog i robotiziranog, pogoduje push-pull pogonski sustav žice te bilo koji sustav kod kojeg je kratak put elektrode do radnog lokaliteta. [18]

Pri automatiziranom zavarivanju kod pištolja za zavarivanje uzima se u obzir toplina generirana pri procesu zavarivanja te njen udio prenesen na pištolj. Stoga je potrebno izabrati pištolj s odgovarajućim hlađenjem. Izbor je moguć između pištolja hlađenih zrakom i pištolja hlađenih vodom. Pištolji hlađeni vodom iziskuju više održavanja. [18]

Kod robotiziranog zavarivanja pištolji za zavarivanje mora, kao i kod automatiziranog, ispuniti dimenzijske uvjete kako bi fizički stao u steznu napravu manipulatora. Kako bi se udovoljili zahtjevi robotiziranog zavarivanja dostupne su razne konfiguracije pištolja za zavarivanje s modificiranim dijelovima, poput, sapnica manjih promjera, sustava za izmjenu pištolja i slično. Zahtjevi izbora hlađenja su jednaki onima kao kod automatiziranog zavarivanja, oni su, produktivnost i implementirani program preventivnog održavanja. [18]

Prednosti automatiziranog i robotiziranog MIG zavarivanja su: [3]

- Ujednačenija kvaliteta.
- Ujednačeniji i prihvatljiviji estetski izgled zavara.
- Smanjen broj stanaka i ponovnih početaka, shodno tome smanjen broj grešaka.
- Veće brzine zavarivanja, manji unos topline, smanjenje ZUT-a, smanjenje toplinskih deformacija.
- Smanjenje vremena zavarivanja, povećanje produktivnosti i smanjenje troškova proizvodnje.
- Veća jakost struje zavarivanja, povećana penetracija, smanjen broj prolaza
- Uslijed manjka vještih zavarivača, automatizirano i robotizirano zavarivanje je samo po sebi prednost.

---

Neki od nedostataka su: [3]


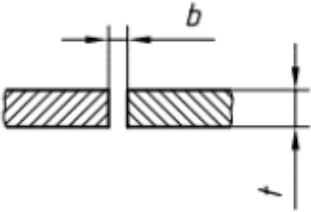
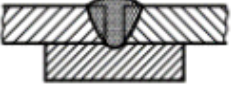
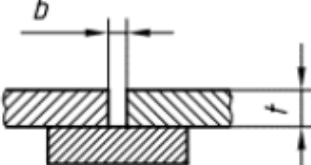

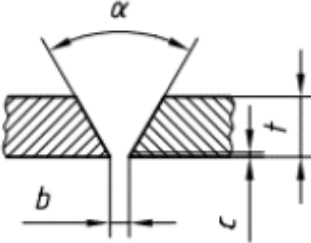
- Preciznija i ujednačena priprema zavarenog spoja.
- Zahtjeva više planiranja kako bi se iskoristile prednosti.
- Potrebna novčana investicija u opremu, manipulatore, stezne naprave.
- Troškovi održavanja su veću u usporedbi s opremom za klasičan postupak MIG zavarivanja
- Prednosti visoke depozicije dodatnog materijala moguće je postići isključivo u horizontalnom te iznimno vertikalno položaju zavarivanja.

## **2.4. Priprema spojeva za zavarivanje aluminija prema normi HRN EN ISO 9692-3**


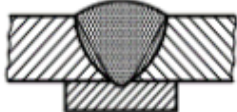
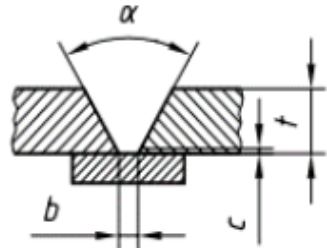

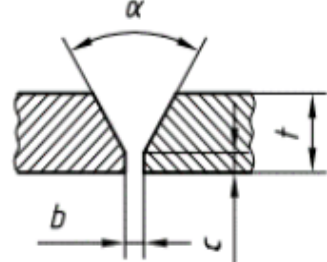

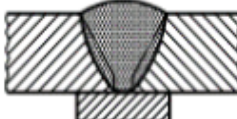
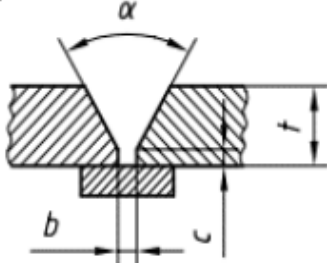
Norma HRN EN ISO 9692-3 se odnosi na pripremu spojeva za MIG i TIG postupke zavarivanja svih zavarljivih aluminijevih legura. Rubovi zavara moraju biti pripremljeni mehaničkim metodama (odsijecanjem, piljenjem ili glodanjem). Potrebno je izbjegavati upotrebu sredstava za čišćenje na bazi mineralnih ulja. Kod rezanja plazma postupkom potrebno je obratiti pozornost na kvalitetu rezane površine. Pri razmacima većim od 1,5 mm preporučuje se upotreba podloga. [23]

U tablici 8. i 9. možemo vidjeti nekolicinu primjera pripremljenih spojeva određene debljine s definiranim detaljima spoja i preporučenim postupcima zavarivanja. Priprema spoja obuhvaćena normom ISO 9692-3 se odnosi na MIG i TIG postupke zavarivanja. Brojčane oznake procesa, MIG – 113 i TIG – 114 su specificirane normom ISO 4063. [23]

Tablica 8. Usporedba pripreme spojeva sa i bez podloge [24]

Debljina osnovnog materijala $t$	Oznaka	Ilustracija	Presjek	Kut $\alpha, \beta$	Razmak $b$	Visina grla $c$
$t \leq 4$				-	$b \leq 2$	-
$2 \leq t \leq 4$	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div>  </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">MR</div> <div>  </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">M</div> </div>			-	$b \leq 1,5$	-
$3 \leq t \leq 5$	V			$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 3$	$c \leq 2$
				$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$b \leq 2$	

Tablica 9. Nastavak

Debljina osnovnog materijala $t$	Oznaka	Ilustracija	Presjek	Kut $\alpha, \beta$	Razmak $b$	Visina grla $c$
$3 \leq t \leq 5$				$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$b \leq 4$	$c \leq 2$
$3 \leq t \leq 15$	Y			$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 2$	$c \leq 2$
$6 \leq t \leq 25$				$\alpha \geq 50^\circ$	$4 \leq b \leq 10$	$c = 3$

### 3. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu rada bilo je potrebno zavariti uzorke od aluminijeve legure sa i bez primjene keramičke podloge uz primjenu MIG impulsnog načina zavarivanja. Definirane su tehnologije za oba slučaja i provedena ispitivanja.

Za svaki sučeljeni spoj izrađen je po jedan uzorak za ispitivanje savijanjem lica i ispitivanje savijanjem korijena zavora, dok norma HRN EN ISO 15614-2 definira po dva uzorka za navedeno ispitivanje. Uzeti su i po jedan makro izbrusak od oba sučeljena spoja te je na njima napravljena mikroskopska analiza.

#### 3.1. Osnovni i dodatni materijal

##### 3.1.1. Svojstva i kemijski sastav osnovnog materijala EN AW 5083-H111

U tablici 10. prikazana su mehanička svojstva, a u tablici 11. kemijski sastav osnovnog materijala EN AW 5083-H111.

**Tablica 10. Mehanička svojstva osnovnog materijala [25]**

Gustoća [ $\text{g/cm}^3$ ]	2,66
Modul elastičnosti [ $\text{kN/mm}^2$ ]	71
Vlačna čvrstoća [MPa]	300
Tvrdoća [HB]	75
Toplinska provodnost [W/mK]	117
Električna vodljivost [%IACS]	28,5
Granica elastičnosti [MPa]	190

**Tablica 11. Kemijski sastav osnovnog materijala [25]**

Al	92,4 – 95.6 %
Cr	0.05 - 0.25 %
Cu	< 0.10 %
Fe	< 0.40 %
Mg	4.0 - 4.9 %
Mn	0.40 - 1.0 %
Si	< 0.40 %
Zn	< 0.25 %

**3.1.2. Mehanička svojstva i kemijski sastav dodatnog materijala**

Kao dodatani materijal korištena je žica tvorničkog naziva AUTROD 5183 tvrtke ESAB. Promjer žice je 1,2 mm te je izrađena od aluminijske legure EN AW 5083. U tablici 12. prikazan je kemijski sastav, a u tablici 13. mehanička svojstva dodatnog materijala.

**Tablica 12. Kemijski sastav dodatnog materijala [26]**

Al	Mg	Zn	Fe	Cu	Ti	Si	Mn	Cr
94,2 %	4,9 %	0.01 %	0.13 %	0.01 %	0.1 %	0.04 %	0.65 %	0.08 %

**Tablica 13. Mehanička svojstva dodatnog materijala [27]**

Vlačna čvrstoća [MPa]	Granica elastičnosti [MPa]	Istezanje [%]	Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]
275, min	125, min	17	2,66

### 3.2. Izvor struje za zavarivanje

Izvor struje za zavarivanje pomoću kojeg je izveden ovaj eksperimentalni rad u Laboratoriju za zavarivanje FSB je Welbee P400 (slika 16.). Tablica 14. prikazuje tehničke specifikacije izvora struje za zavarivanje.



Slika 16. Izvor struje za zavarivanje Welbee P400

Tablica 14. Prikaz tehničkih specifikacija izvora struje za zavarivanje Welbee P400 [28]

Broj faza	3
Frekvencija [Hz]	50
Nazivni ulazni napon [V]	400 +/- 15%
Ulazna snaga [kW]	17,4
Nazivna struja zavarivanja [A]	400
Nazivni napon opterećenja [V]	34
Raspon struje zavarivanja [A]	30 - 400
Raspon napona za zavarivanje [V]	12 - 34
Masa [kg]	62
Dimenzije [visina, debljina, širina]	395 x 710 x 592
Statička karakteristika	CV

### 3.3. Ostala oprema

#### 3.3.1. Uređaj za automatizirano gibanje pištolja



**Slika 17. Uređaj za automatizirano gibanje pištolja**

Zavarivanje je izvedeno na uređaju za automatizirano gibanje pištolja (slika 17.).



### 3.3.2. Podloge za zavarivanje

Na slici 18. prikazane su keramičke podloge koja su korištene pri zavarivanju uzorka A, dok slika 19. prikazuje bakrenu podlogu koja je korištena kod uzorka B.



**Slika 18. Keramička podloga [30]**

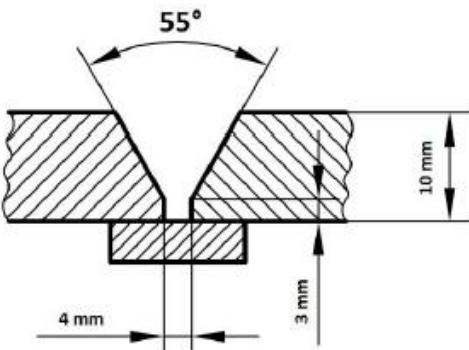



**Slika 19. Prikaz bakrene podloge**

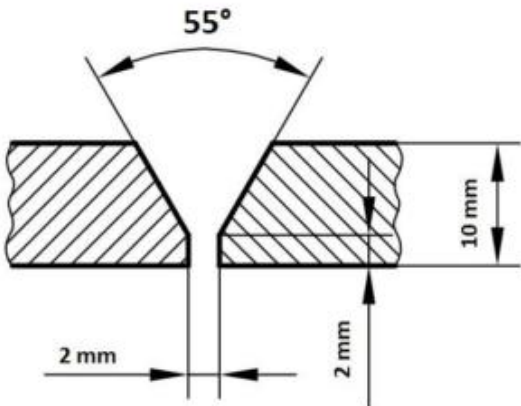
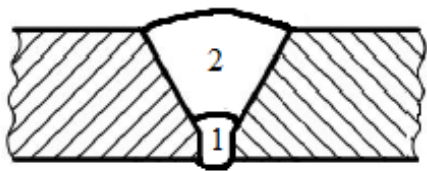
### 3.4. Zavarivanje uzoraka

Tablice 15. i 16. prikazuju specifikacije postupka zavarivanja uzoraka A i B.

**Tablica 15. Specifikacije postupka zavarivanja uzorka A**

Mjesto: Zagreb Oznaka uputstva za zavarivanje (WPS): 02/2017 Broj izvještaja o odobrenju postupka (WPAR): Poduzeće: Ime zavarivača: Postupak zavarivanja: 131 Vrsta zvara i spoj: sučeljeni spoj Pojednosti pripreme žlijeba: V – priprema, keramička podloga					Ispitno mjesto: FSB, Zagreb Način pripreme rubova i čišćenje: Specifikacija osnovnog materijala: AW 5083 HRN EN ISO 18273:2016 Debljina osnovnog materijala: 10 mm Položaj zavarivanja: PA Tehnika zavarivanja: Neutralna			
<b>Oblikovanje zavarenog spoja</b>					<b>Redoslijed zavarivanja</b>			
								
Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
1	131	1,2	163	21,5	DC + (impulsno)	9	290	0,58
2	131	1,2	197	23,2	DC + (impulsno)	11,5	290	0,756
<b>Dodatni materijal:</b> ESAB Autorod 5183 <b>Zaštitni plin/prašak:</b> 100% Argon <b>Protok plina:</b> 16 l/min <b>Temperatura predgrijavanja:</b> -					<b>Dodatne informacije:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pripremiti kuteve tako da kut između njih bude 55°</li> <li>2. Postaviti limove s razmakom od 4 mm između njih</li> <li>3. Zalijepiti keramičku podlogu tako da mjesto zvara bude iznad keramičke podloge</li> </ol>			

Tablica 16. Specifikacije postupka zavarivanja uzorka B

Mjesto: Zagreb Oznaka uputstva za zavarivanje (WPS): 02/2017 Broj izvještaja o odobrenju postupka (WPAR): Poduzeće: Ime zavarivača: Postupak zavarivanja: 131 Vrsta zavarivanja i spoj: sučeljeni spoj Pojediniosti pripreme žlijebe: V - priprema, bakrena podloga					Ispitno mjesto: FSB, Zagreb Način pripreme rubova i čišćenje: Specifikacija osnovnog materijala: AW 5083 HRN EN ISO 18273:2016 Debljina osnovnog materijala: 10 mm Položaj zavarivanja: PA Tehnika zavarivanja: Neutralna			
Oblikovanje zavarenog spoja					Redoslijed zavarivanja			
								
Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet	Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
1	131	1,2	160	21,5	DC + (impulsno)	9	290	0,569
2	131	1,2	183	22,5	DC + (impulsno)	11,5	290	0,681
<b>Dodatni materijal:</b> ESAB Autorod 5183 <b>Zaštitni plin/prašak:</b> 100% Argon <b>Protok plina:</b> 16 l/min <b>Temperatura predgrijavanja:</b> -					<b>Dodatne informacije:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pripremiti kuteve tako da kut između njih bude 55°</li> <li>2. Postaviti limove s razmakom od 2 mm između njih</li> </ol>			

Unos topline kod zavarivanja uzoraka računan je prema izrazu:

$$Q = \frac{U \times I \times 60}{v_z \times 1000} \times \eta \text{ [kJ/mm]}$$

gdje je:

U – napon zavarivanja [V]

I – struja zavarivanja [A]

$\eta$  – stupanj iskoristivosti (prema HRN EN 1011-1 za MIG postupak iznosi 0,8)

$v_z$  – brzina zavarivanja [mm/min]

Na slikama 20., 21., 22. i 23. prikazani su izgledi lica i korijena zavora na uzorcima A i B

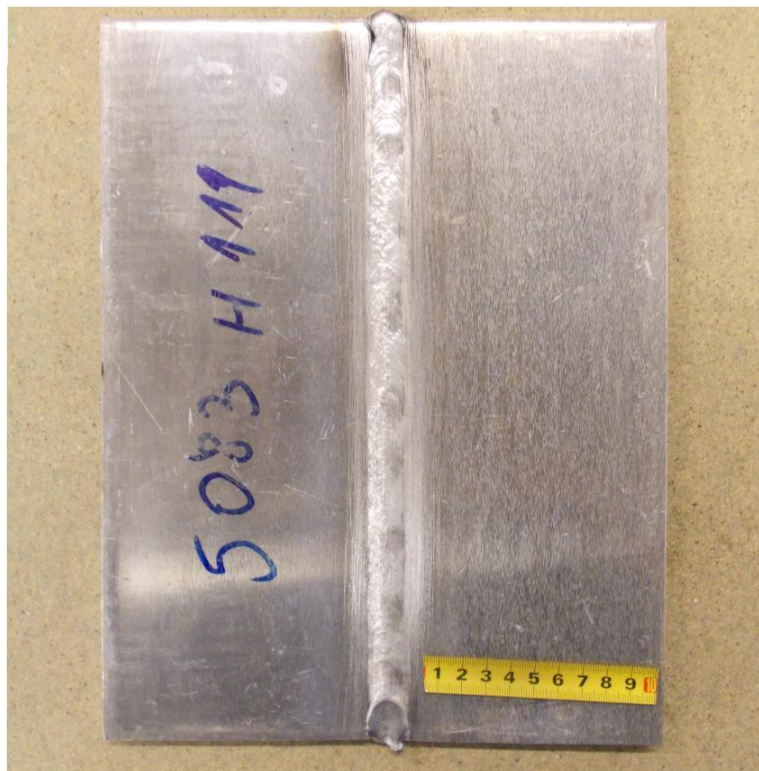


**Slika 20. Lice zavora uzorka A**





**Slika 21. Korijen zavara uzorka A**



**Slika 22. Lice zavara uzorka B**



**Slika 23. Korijen zavora uzorka B**

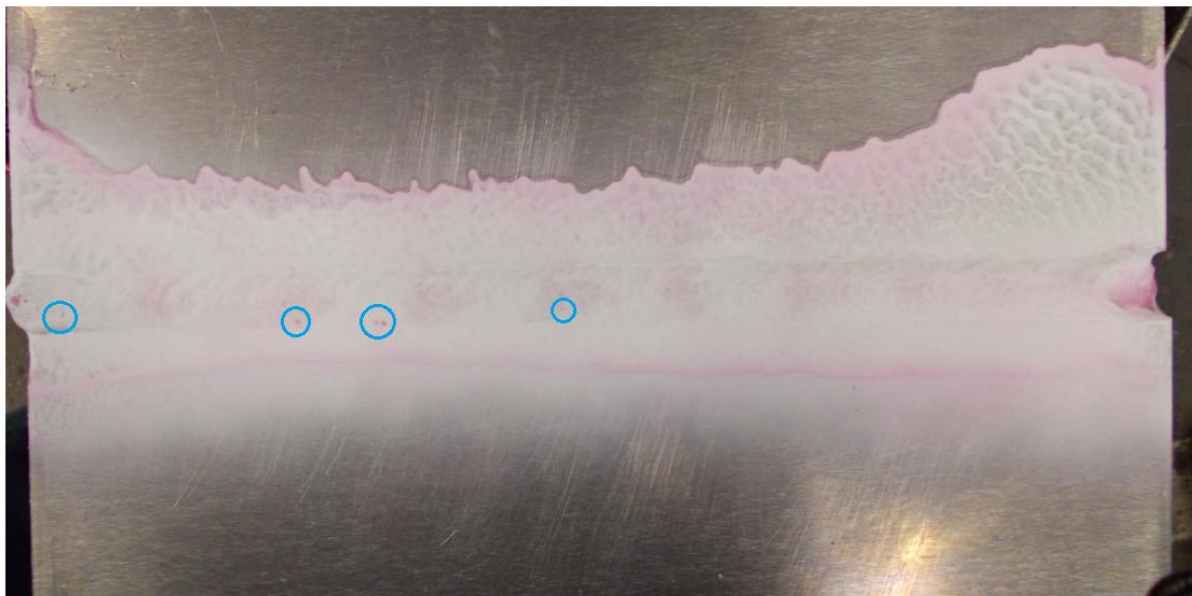
### **3.5. Nerazorno ispitivanje penetrantima**

Ispitivanje penetrantima je metoda ispitivanja koja omogućuje otkrivanje površinskih nepravilnosti. Postupak se provodi pomoću čistača, penetranta i razvijača. Prije samog postupka površina zavora je očišćena 98% etanolom.

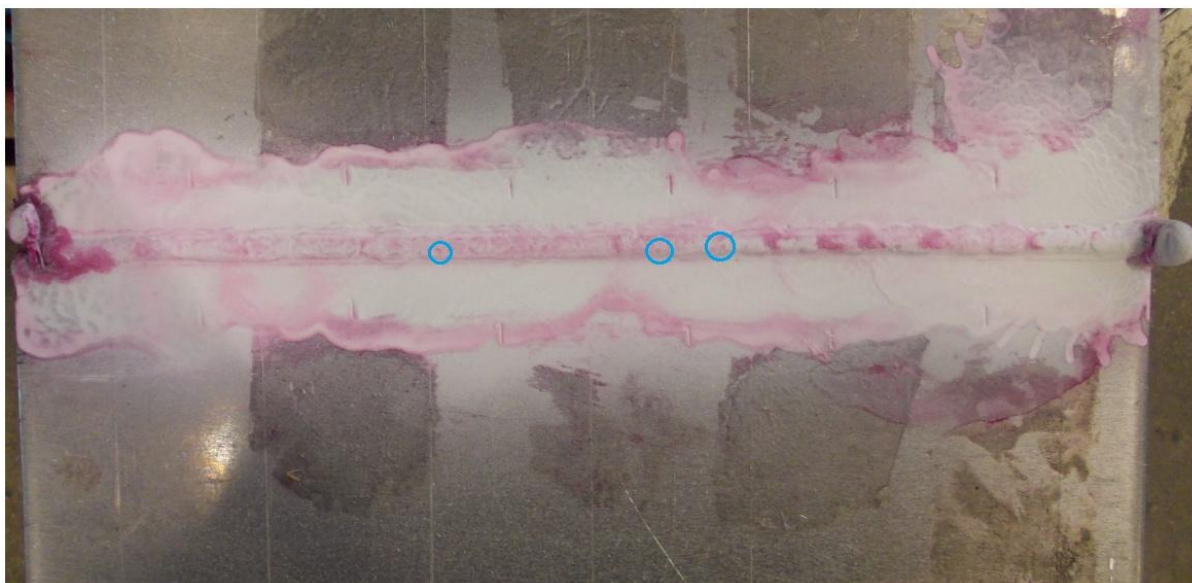
Postupak se sastoji od 3 koraka:

- Čišćenje površine zavora čistačem Elite Flaw Findr - BC1 nakon čega se pričekava 5 minuta.
- Nanošenje penetranta Elite Flaw Findr – K71B2p i puštanje 10-15 minuta da penetrant prodre u svaku pukotinu.
- Ispiranje penetranta mlazom vode, sušenja uzoraka i nanošenje razvijača Elite Flaw Findr D112A BIO DEVELOPER. Pričekamo 10 minuta da se osuši.

Nakon trećeg koraka postupka lokaliteti s pogreškama odnosno pukotinama vidljivi su crvenim točkama, odnosno naznačeni plavim krugovima, kako se vidi na slikama 24., 25., 26. i 27.

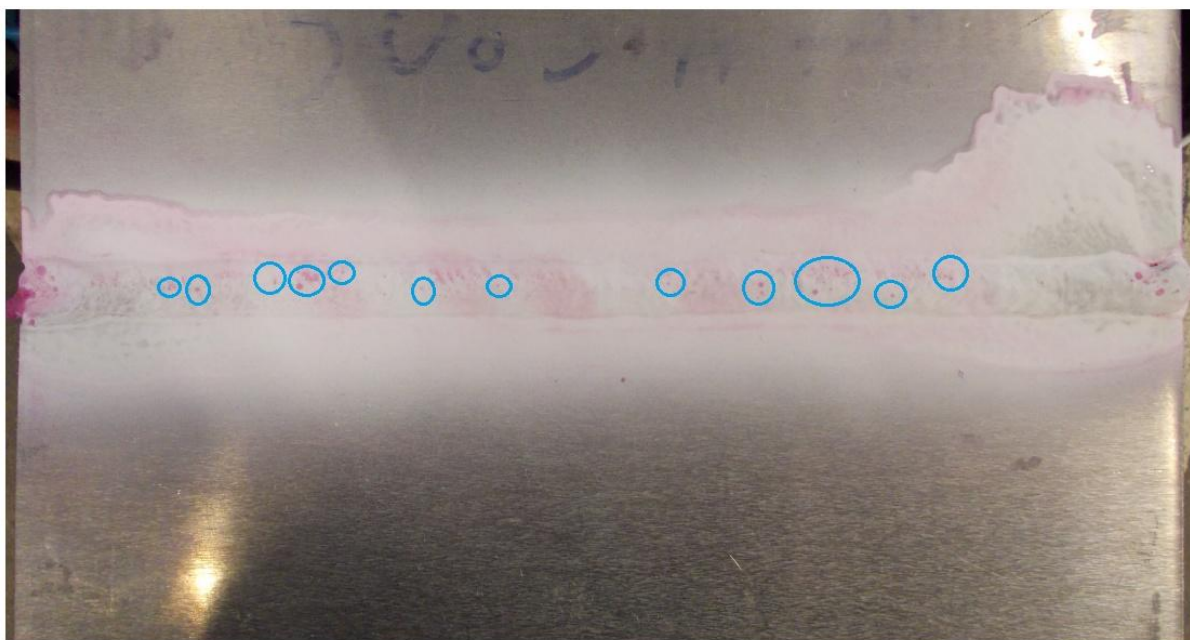


**Slika 24. Ispitivanje penetrantima lica zavara uzorka A**

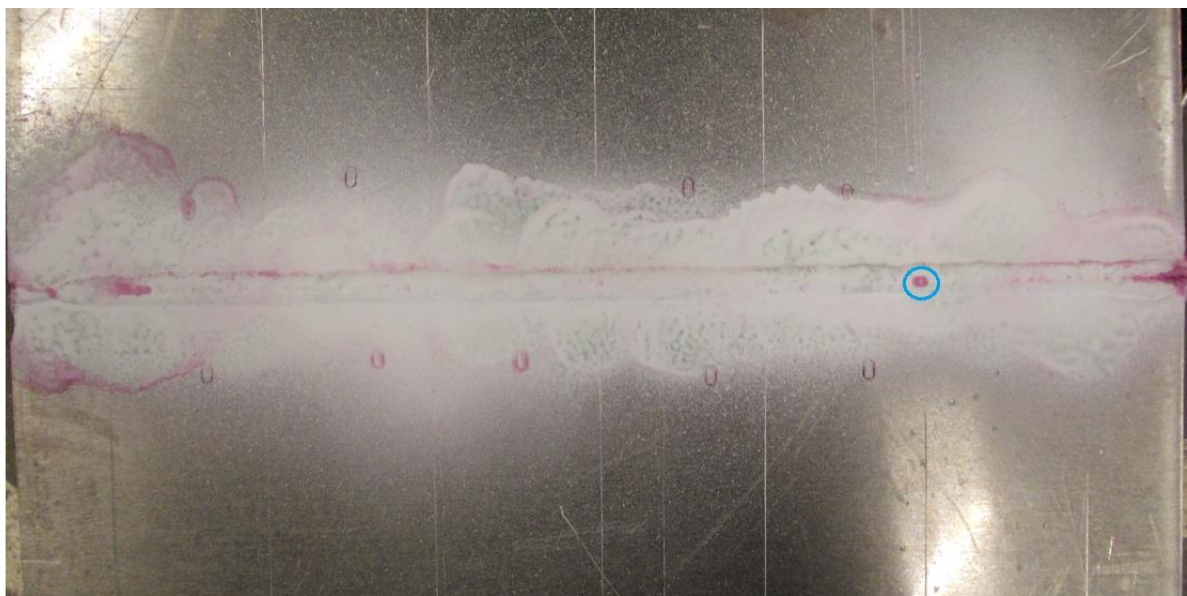


**Slika 25. Ispitivanje penetrantima korijena zavara uzorka A**





**Slika 26. Ispitivanje penetrantima lica zavara uzorka B**

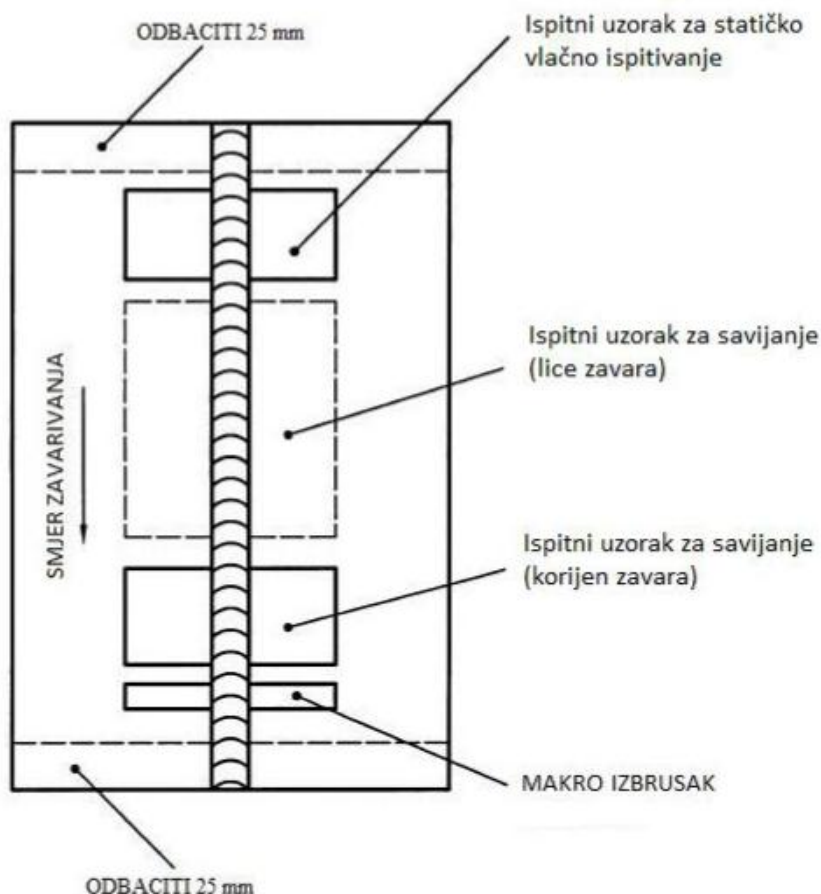


**Slika 27. Ispitivanje penetrantima korijena zavara uzorka B**



### 3.6. Ispitivanje savijanjem

Kako je već spomenuto, za svaki je sučeljeni spoj je izrezan po jedan uzorak za lice zavora i jedan uzorak za korijen zavora za ispitivanje savijanjem. Na slici 28. prikazani su lokaliteti na kojima su izrezani ispitni uzorci kod ovog eksperimentalnog rada.



**Slika 28. Lokaliteti izrezivanja ispitnih uzoraka [30]**

Ispitni uzorci su izrezani na stroju VANAD Proxima 10/20 plazma postupkom rezanja. Rezano je pri struji od 80 A, brzinom od 70 cm/min. Izrezani uzorci su nakandno brušeni. Na slici 29. vidimo pripremu za rezanje.



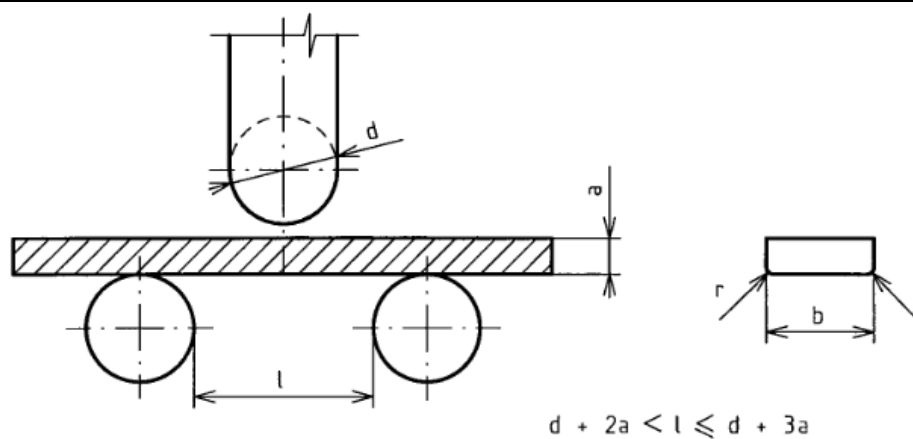
**Slika 29. Priprema za rezanje ispitnih uzoraka**

Ispitivanje savijanjem je izvršeno u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (slika 31.). Oba uzorka sučeljenog spoja su ispitana poprečnim savijanjem na lice zavara i korijen zavara prema HRN EN ISO 5173:2010. Ispitane su po jedna epruveta na lice zavara uzorka A i B i po jedna epruveta na korijen zavara uzorka A i B.

Dimenzije ispitnih uzoraka za savijanje su 215 mm duljine, 40 mm širine (b), 10 mm debljine (a), a promjer trna na stroju za savijanje je 36 mm (d). Dimenzije su vidljive na slici 30.

Slika 31. prikazuje ispitivanje savijanjem u Laboratoriju za zavarivanje na FSB-u.

U tablicama 17. i 18. prikazani su rezultati ispitivanja savijanjem.





Slika 30. Prikaz ispitivanja sučeonog zavarenog spoja na savijanje [29]





Slika 31. Prikaz ispitivanja savijanjem u Laboratoriju za zavarivanje na FSB [30]

**Tablica 17. Rezultati savijanja lica i korijena zavora uzorka A**

Uzorak A	
Lice zavora	Korijen zavora
	

Tablica 18. Rezultati savijanja lica i korijena zavara uzorka B

Uzorak B	
Lice zavara	Korijen zavra
	

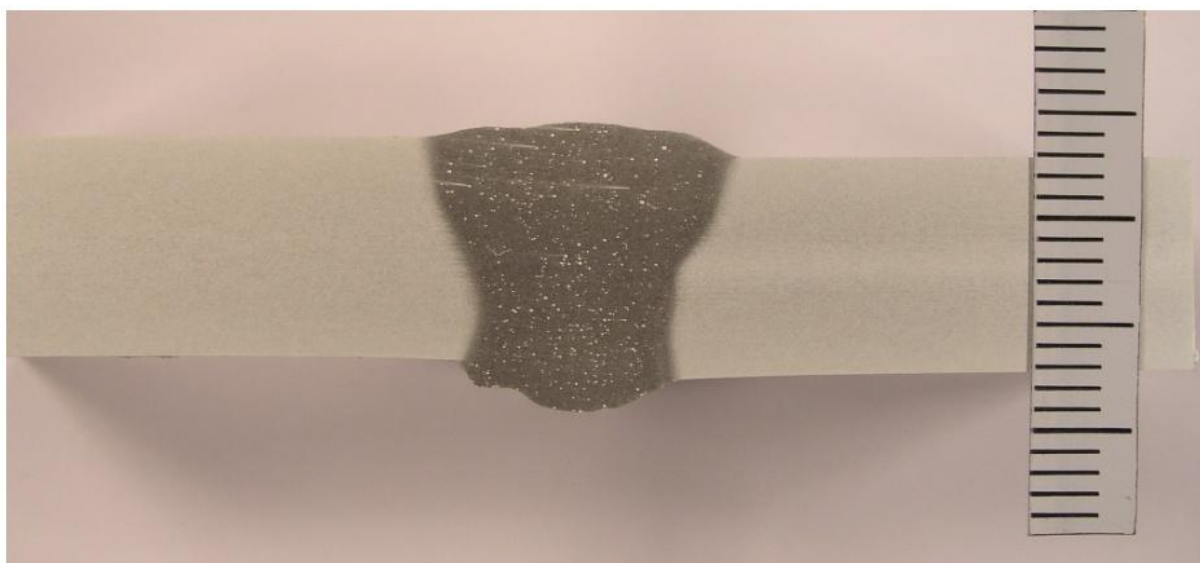
Iz tablice 17. vidljivo je da je kod uzorka A došlo do pucanja na licu i na korijenu zavara, dok na uzorku B nisu vidljiva nikakve naznake pucanja.



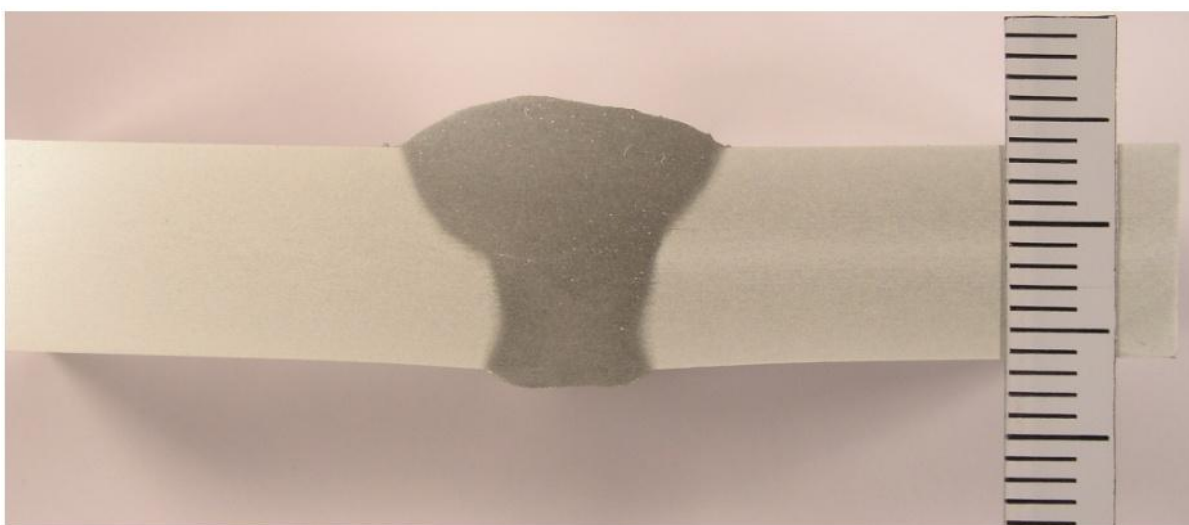
### 3.7. Makro i mikroskopska analiza

#### 3.7.1. Makro izbrusci

Uzorci za makro i mikroskopsku analizu izrezani su u Laboratoriju za zavarivanje FSB, nakon čega su polirani u Laboratoriju za materijalografiju. Nakon brušenja uzorke je bilo potrebno elektrolitski nagristi u Kellerovom reagentu. Dobiveni makro izbrusci vidljivi su na slikama 32. i 33.



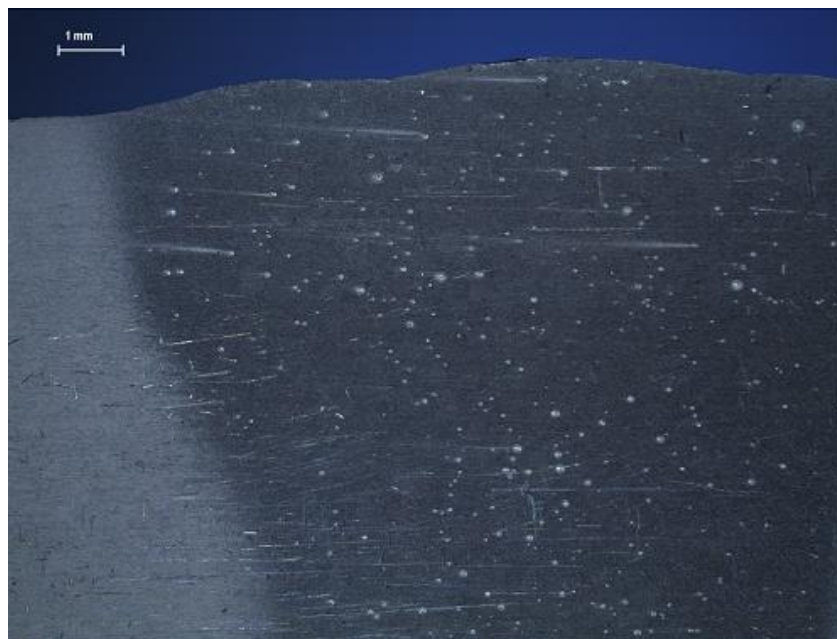
Slika 32. Prikaz makro izbruska uzorka A



Slika 33. Prikaz makro izbruska uzorka B

### 3.7.1. Mikroskopska analiza

Mikroskopska analiza je izrađena u Laboratoriju za zaštitu materijala FSB. Makro izbrusci su analizirani na mikroskopu Leica MZ6, a povećanje je iznosilo 10x. Na slikama 34., 35. i 36. prikazani su detalji makro izbruska uzorka A, a na slikama 37., 38. i 39. prikazani su detalji makro izbruska uzorka B.



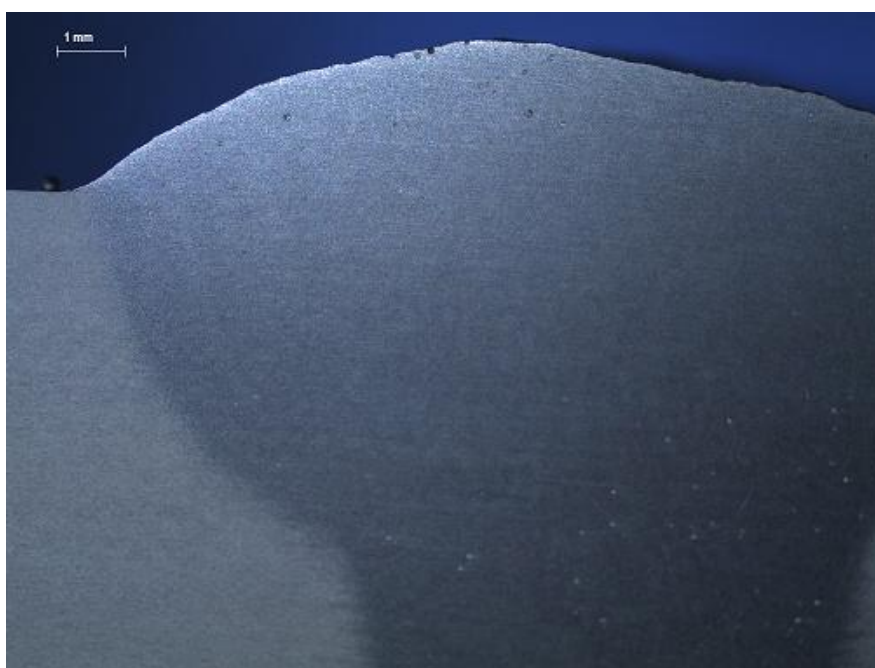
Slika 34. Mikroskopska analiza uzorka A – detalj lice zavora, lijevo



Slika 35. Mikroskopska analiza uzorka A – detalj lice zavora, desno

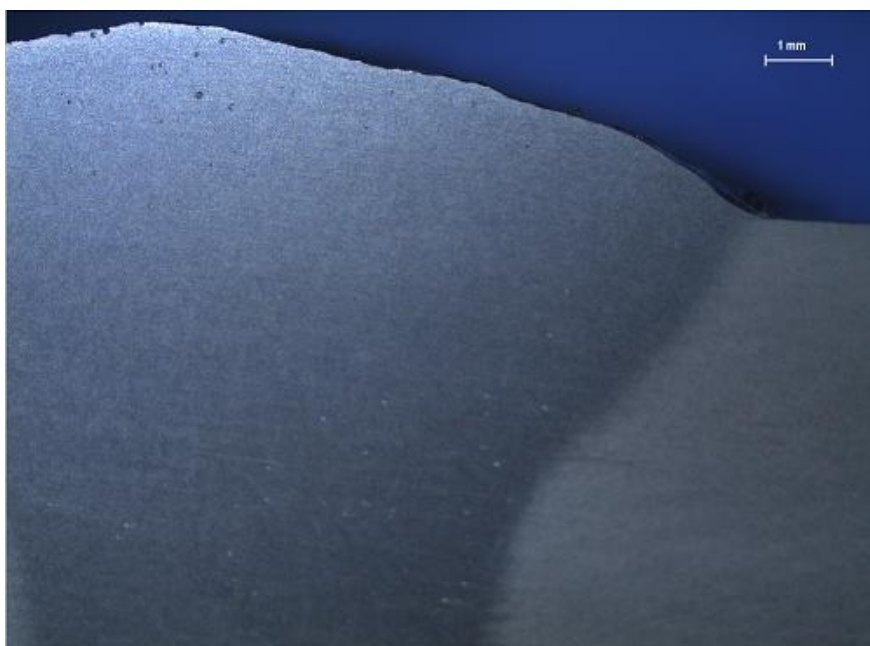


**Slika 36. Mikroskopska analiza uzorka A – detalj korijen zavora**

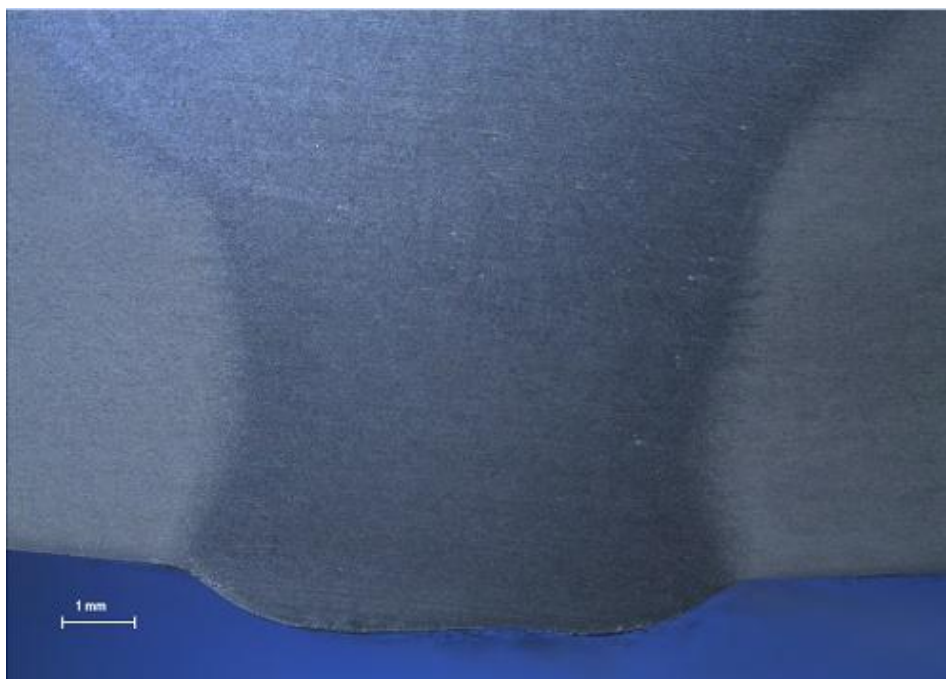


**Slika 37. Mikroskopska analiza uzorka B – detalj lice zavora, lijevo**





**Slika 38. Mikroskopska analiza uzorka B – detalj lice zavara, desno**



**Slika 39. Mikroskopska analiza uzorka B – detalj korijen zavara**

Na slikama 37. i 38. vidimo pojavu pora u drugom sloju zavara, dok je na slikama 34., 35. i 36. uočljiva izražena ljevačka struktura aluminija, ali usprkos njoj vidljivo je da nema pojave pora.

## 4. ZAKLJUČAK

Jedinstvena svojstva aluminijskih legura čine ih najsvestranijim i ekonomski atraktivnim metalnim materijalima za širok spektar upotrebe. Većinom zavarljive, izuzev određenih koje se smatraju neprikladnim za zavarivanje (2xxx i 7xxx serije), aluminijske legure zahtijevaju upotrebu odgovarajuće tehnologije zavarivanja kako bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta. Postupcima poput MIG, TIG, laserskog, plazma i elektrootpornog zavarivanja uz ispunjenje zahtijevanih uvjeta, poput prikladnog dodatnog materijala, zaštitnog plina, opreme, parametara zavarivanja i dr., moguće je postići zadovoljavajuću kvalitetu zavarenih spojeva aluminijskih legura. Uz poroznost kao osnovnu prateću pojavu zavarivanja aluminijskih legura postoji opasnost od toplih pukotina, slabe difuzije, redukcije korozijske i električne otpornosti te redukcije čvrstoće u području zavara.

U eksperimentalnom radu zavarena su dva sučeljena spoja aluminijske legure EN AW 5083-H111. Jedan sučeljeni spoj zavaren je uz korištenje keramičkih podloga koje su zalijepljene s korijenske strane zavara, njegovi su ispitni uzorci naslovljeni kao uzorak A. Drugi je sučeljeni spoj ostvaren uz korištenje bakrene podloge te su njegovi ispitni uzorci naslovljeni kao uzorak B. Oba su uzorka zavarena korištenjem iste tehnike zavarivanja, jednakom brzinom dobave žice i brzinom zavarivanja, upotrebom 100% Ar kao zaštitnog plina pri istom protoku te istim postupkom, impulsnim MIG (DC+) na istom uređaju. Osnovna razlika, izuzev razlike u upotrebi podloge, čini različita priprema spoja koju propisuje norma HRN EN ISO 9692-3 i jakost struja postavljena za drugi sloj uzorka B koja je niža u odnosu na jakost struje istog sloja uzorka A. Cilj upotrebe povišene jakosti struje kod oba uzorka je bio smanjenje broja prolaza, što je uspješno ostvareno.

Rezultati nerazornog ispitivanja penetrantima pokazali su pojavu pukotina na licu i korijenu oba uzorka, što možemo pripisati upotrebi neprikladnih parametara zavarivanja. Pri ispitivanju savijanjem došlo je do pucanja lica i korijena uzorka A, a glavni razlog tome je prevelik unos topline uslijed povišene struje zavarivanja. Uzorak B nije puknuo pri ispitivanju savijanjem, ali kod njega je vidljiv značajan broj pukotina na licu. Kod uzorka B vidljiva je i pojava pora pri vrhu lica zavara, u drugom sloju, dok je zbog izražene ljevačke strukture teško uočljiva pojava pora kod makro izbruska uzorka A. Nastanak pora je uzrokovan neprikladnim parametrima ili lošom kvalitetom osnovnog materijala.

Kako bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta zavara bilo je potrebno napraviti zavarivanje u više od dva prolaza (tri ili četiri). Povećanjem broj prolaza treba smanjiti jakost struje u svakom od prolaza. Jakost struje zavarivanja trebala bi okvirno biti od 130 do 140 A za prvi sloj (korijen zavara), a svaki slijedeći od 150 do 180 A. Sa smanjivanjem struje preko sinergijskog rada uređaja automatski se smanjuje i brzina žice.

## LITERATURA

- [1] Kovačiček, F., Indof, J., Filetin, T.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2009.
- [2] Sheasby, P.G., Pinner Herold, R.: The Surface Treatment and Finishing of Aluminum and Its Alloys, ASM International, 2001.
- [3] Mathers, G.: The welding of aluminium and its alloys, Cambridge, 2002.
- [4] Davis, J.R.: Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, 1993.
- [5] Više autora: ASM Handbook, Volume 2 – Properties and Selection: Nonferrous alloys and special – purpose materials, ASM International, 1992.
- [6] Kaufman, J.G.: Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes and Applications, ASM International, 2004.
- [7] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1426843813-0-im\\_oznacivanje-al.ppt](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426843813-0-im_oznacivanje-al.ppt)- dostupno 4.2.2017.
- [8] Više autora: Aluminium and the sea, Alcan aerospace, transportation and industry, 2004.
- [9] Skillingberg, M.: Aluminum at sea: Speed, endurance and affordability. The Aluminum Association, 2009.
- [10] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š.: Zavarivački i srodni postupci, FSB, Zagreb, 2015.
- [11] Vručinić, G.: Zavarivanje i zavarljivost aluminija i legura, 5.Seminar DTZI, Pula, 2008.
- [12] Ferraris, S., Volpone, L.M.: Aluminium alloys in third millennium shipbuilding: Materials, technologies, perspectives, The Fifth International Forum on Aluminum Ships, Tokyo, 2005.
- [13] Denney, P.: Hybrid Laser Arc Welding, Lincoln Electric Corporation, Cleveland, 2010.
- [14] Colligan, K.J.: Friction Stir Welding for Ship Construction, Concurrent Technologies Corporation, 2004.
- [15] Levshakov, V.M., Steshenkova, N.A., Nosyrev, N.A.: High-Production Laser and Plasma Welding Technologies for High-Speed Vessels Production, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering Vol 8, No 9, 2014.
- [16] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1398155789-0-mig\\_magzav1.ppt](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1398155789-0-mig_magzav1.ppt)- dostupno 4.1.2017.

- [17] [http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable\\_AluminumMIGGM\\_AWWires-SuperGlaze-SuperGlaze5356TM/c8100.pdf](http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_AluminumMIGGM_AWWires-SuperGlaze-SuperGlaze5356TM/c8100.pdf) – dostupno 4.1.2017.
- [18] [https://www.lincolnelectric.com/assets/global/products/consumable\\_miggmawwires-superarc-superarcl-56/c4200.pdf](https://www.lincolnelectric.com/assets/global/products/consumable_miggmawwires-superarc-superarcl-56/c4200.pdf) - dostupno 5.1.2017.
- [19] [http://lindeplin.hr/dat/shieldinggases\\_.pdf](http://lindeplin.hr/dat/shieldinggases_.pdf) - dostupno 5.1.2017.
- [20] Garašić, I., Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, FSB, Zagreb, 2016.
- [21] Rudan, M.: Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom, 4.Seminar DTZI, Pula, 2007.
- [22] Rosado, T., Almeida, P., Pires, I., Miranda, R., Quintino, L.: Innovations in arc welding, Lisboa, Portugal, 2008.
- [23] [hsevi.ir/RI\\_Standard/File/7605](http://hsevi.ir/RI_Standard/File/7605) – dostupno 17.1.2017.
- [24] Norma HRN EN ISO 9692-3:2000, Zavarivanje i srodni procesi - Preporuke za pripremu spoja - 3. dio: MIG i TIG zavarivanje aluminija i aluminijских legura
- [25] <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bd6317b19dd94faf8bff851e4f339e88> - dostupno 7.2.2017.
- [26] <http://www.esab.co.uk/gb/en/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=410938&tab=2> - dostupno 7.2.2017.
- [27] <http://www.eurocardis.com/hojastecnicas/hilosaluminio/OKAutrod5183.pdf> - dostupno 8.2.2017.
- [28] <http://www.otc-daihen.de/index.php?id=2585> – dostupno 8.2.2017.
- [29] [http://web.czie.net/jxx/weld/upload/%E6%A0%87%E5%87%86/EN\\_ISO%E6%A0%87%E5%87%86/BS%20EN%20910.pdf](http://web.czie.net/jxx/weld/upload/%E6%A0%87%E5%87%86/EN_ISO%E6%A0%87%E5%87%86/BS%20EN%20910.pdf) - dostupno 9.2.2017
- [30] Sinanović, A.: Primjena keramičkih podloga kod zavarivanja aluminija, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2016.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**